

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Воронежский государственный технический университет»  
Кафедра конструирования и производства радиоаппаратуры

Н.Э. Самойленко  
Н.В. Ципина

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ  
СТРУКТУРНОГО СИНТЕЗА В ЗАДАЧАХ  
ПРОЕКТИРОВАНИЯ РЭС: ПРАКТИКУМ**

Утверждено Редакционно-издательским советом  
университета в качестве учебного пособия

Воронеж 2022

УДК 681.365

Самойленко Н. Э., Ципина Н.В. Математическое обеспечение структурного синтеза в задачах проектировании РЭС: практикум: учеб. пособие [Электронный ресурс]/ Самойленко Н. Э., Ципина Н.В.– Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2022.

Учебное пособие содержит общие принципы построения САПР, виды обеспечения САПР, методы решения инженерных задач анализа и оптимизации в задачах проектирования и производства радиоаппаратуры, а также методические и справочные материалы, необходимые для проведения и подготовки практических занятий в интерактивной форме по дисциплине «Математическое моделирование при проектировании электронных средств» для студентов направлений подготовки магистров 11.04.03 "Конструирование и технология электронных средств" магистерским программам "Автоматизированное проектирование и технология радиоэлектронных средств специального назначения", "Силовая электроника" очной и заочной форм обучения.

Ил. 16. Библиогр.: 7 назв.

Научный редактор д-р техн. наук, проф. А.В. Башкиров

Рецензенты: кафедра основ радиотехники и электроники  
Воронежского института ФСИН России  
(нач. кафедры канд. техн. наук, доц.  
Р.Н. Андреев);

д-р техн. наук, проф. В.М. Питолин

© Самойленко Н.Э., Ципина Н.В. 2022

© Оформление. ФГБОУ ВО  
«Воронежский государственный  
технический университет», 2022

## ВВЕДЕНИЕ

В учебном пособии отражена методика изучения учебной дисциплины «Математическое моделирование при проектировании ЭС», рассмотрен состав математического обеспечения структурного синтеза электронных средств, включая базовые математические модели и методы решения задач, возникающих в процессе автоматизированного

Цели и задачи дисциплины – овладение теоретическими знаниями, практическими навыками и умениями выполнения задач деятельности магистра техники и технологии по экспериментально-статистическому исследованию, аналитическому и имитационному моделированию конструкций РЭС, а также освоение методологии многовариантного автоматизированного проектирования конструкций РЭС, способов верификации и коррекции проектных решений. Для достижения цели ставятся задачи: изучить математическую постановку и методы исследования для решения задач многовариантного анализа и оптимального синтеза конструкций РЭС с применением современных САПР.

Основные дидактические единицы (разделы):

Теоретическое и экспериментальное исследование объектов радиоэлектронных средств с целью их модернизации или создания новых конструкций и технологий. Модели иерархических уровней проектирования РЭС. Многовариантный анализ и верификация проектных решений. Ковариационный факторный анализ. Методология планирования экстремального эксперимента. Сетевые методы имитационного моделирования. Метод конечных элементов в задачах анализа полей в конструкциях РЭС. Методы структурного синтеза в проектировании РЭС. Типовые задачи структурного синтеза: типизация, покрытие, компоновка, размещение, трассировка. Современные системы моделирования и оптимизации. Использование и совершенствование программных продуктов, ориентированных на решение научных, проектных и

технологических задач; организация модельных и натуральных экспериментов

В результате изучения дисциплины «Математическое моделирование при проектировании электронных средств» студент должен:

знать: методы получения аналитических моделей конструкций РЭС на различных уровнях иерархии; методы получения экспериментально-статистических моделей на основе планирования эксперимента; методы получения имитационных моделей; методы структурного синтеза; возможности современных САПР по постановке и решению задач многовариантного анализа;

уметь: строить математические модели конструкций РЭС в соответствии с уровнем иерархии проектируемого объекта; осуществлять выбор и обоснованно применять методы верификации математической модели; формулировать и решать задачи многовариантного анализа конструкций РЭС с применением программного обеспечения современных САПР.

владеть: методами синтеза параметрических и структурных моделей РЭС; навыками верификации результатов проектирования и многовариантного анализа в современных САПР.

проектирования РЭС на основе твердотельного 3D-моделирования систем в современных программных средах автоматизированного проектирования электронных средств.

Учебное пособие содержит необходимый теоретический материал для успешного освоения учебной дисциплины в комплексе с рисунками и примерами решения задач, необходимыми для проведения и подготовки практических занятий по курсу, что обеспечивает комплексную методическую поддержку самостоятельного изучения дисциплины.

В состав учебного пособия входят разделы: современные САПР, методика автоматизированного проектирования электронных средств, особенности применения метода

конечных элементов, методы полного и сокращенного перебора на иерархическом дереве решений, интерактивные технологии в проведении практических занятий, матричные и графовые модели конструкций электронных средств. Приведены вопросы и задания для самостоятельной работы студентов, задания по тематике магистерских работ, а также методические указания по проведению занятий в интерактивной форме.

# 1. СОВРЕМЕННЫЕ САПР

Действенным средством решения этих проблем в последнее десятилетие выступают новые информационные CALS-технологии сквозной поддержки сложной наукоемкой продукции на всех этапах ее жизненного цикла (ЖЦ) от маркетинга до утилизации. Базирующиеся на стандартизованном едином электронном представлении данных и коллективном доступе к ним, эти технологии позволяют существенно упростить выполнение этапов ЖЦ продукта и повысить производительность труда, обеспечить повышение качества продукции.

В настоящее время CALS-технологии в России рассматриваются как средство интеграции в мировую экономику, как важный инструмент реструктуризации всех отраслей промышленности, коренным образом упрощающий внутреннюю и международную промышленную кооперацию. Отставание с внедрением CALS-технологий сделает для предприятий невозможным участие в международной кооперации, негативно отразится на конкурентоспособности и привлекательности производимой продукции, послужит причиной потери определенных сегментов рынка. В области классификации САПР используется ряд устоявшихся англоязычных терминов, применяемых для классификации программных приложений и средств автоматизации САПР по отраслевому и целевому назначению.

По отраслевому назначению принято выделять следующие системы:

- MCAD (англ. mechanical computer-aided design) — осуществляют автоматизированное проектирование механических устройств, машиностроительные САПР, применяются в автомобилестроении, судостроении, авиакосмической промышленности, производстве товаров народного потребления, включают в себя разработку деталей и сборок (механизмов) с использованием параметрического

проектирования на основе конструктивных элементов, технологий поверхностного и объемного моделирования (SolidWorks, Autodesk Inventor, CATIA);

- EDA (англ. electronic design automation) или ECAD (англ. electronic computer-aided design) — САПР электронных устройств, радиоэлектронных средств, ИС, печатных плат и т. п., (Altium Designer, OrCAD);

- АЕС CAD (англ. architecture, engineering and construction computer-aided design) или CAAD (англ. computer-aided architectural design) — САПР в области архитектуры и строительства, используются для проектирования зданий, промышленных объектов, дорог, мостов и прочего (Autodesk Architectural Desktop, Piranesi, ArchiCAD).

По целевому назначению различают САПР или подсистемы САПР, которые обеспечивают различные аспекты проектирования:

- CAD (англ. computer-aided design/drafting) — средства автоматизированного проектирования, в контексте указанной классификации термин обозначает средства САПР предназначенные для автоматизации двумерного и/или трехмерного геометрического проектирования, создания конструкторской и/или технологической документации, САПР общего назначения; для обозначения данного класса средств САПР используется также термин CADD (англ. computer-aided design and drafting), что означает автоматизированное проектирование и создание чертежей; системы геометрического моделирования обозначают как CAGD (англ. computer-aided geometric design);

- САЕ (англ. computer-aided engineering) — средства автоматизации инженерных расчётов, анализа и симуляции физических процессов, осуществляют динамическое моделирование, проверку и оптимизацию изделий; подкласс средств САЕ, используемых для компьютерного анализа, обозначается термином САА (англ. computer-aided analysis);

- CAM (англ. computer-aided manufacturing) — средства технологической подготовки производства изделий, обеспечивают автоматизацию программирования и управления оборудования с числовым программным управлением (ЧПУ) или гибких автоматизированных производственных систем (ГАПС); русским аналогом термина является автоматизированная система технологической подготовки производства (АСТПП);

- CAPP (англ. computer-aided process planning) — средства автоматизации планирования технологических процессов применяемые на стыке систем CAD и CAM.

Многие системы автоматизированного проектирования совмещают в себе решение задач относящихся к различным аспектам проектирования CAD/CAM, CAD/CAE, CAD/CAE/CAM. Такие системы называют комплексными или интегрированными. С помощью CAD-средств создаётся геометрическая модель изделия, которая используется в качестве входных данных в системах CAM, и на основе которой, в системах CAE формируется требуемая для инженерного анализа модель исследуемого процесса.

## 2. МЕТОДИКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

Исходным документом для начала проектирования является техническое задание (ТЗ). В нем перечислены все технические требования, предъявляемые к создаваемой аппаратуре. В состав основных требований входят:

- значения выходных характеристик и их допустимые разбросы;
- показатели надежности: вероятность безотказной работы, время эксплуатации, срок службы и др.;
- условия эксплуатации: влажность, давление, температура и др.;
- специальные воздействия: вибрация, удары, акустический шум, радиация и др.;
- условия хранения и транспортировки.

На основе технического задания создается проект. Это эвристический набросок схемы и конструкции. На этом этапе разрабатываются эскизы структурной и функциональной схем устройства, производится предварительная компоновка и размещение.

Далее разработанный проект исследуется и многократно уточняется, при этом происходит постепенный переход от эскизного проекта к техническому.

На основе эскизов схем и конструкций производится *формализация проекта*, результатом которой являются физические модели схемы и конструкции, составленные в терминах соответствующего научного направления, например, электрические - в терминах электротехники, механические - в терминах механики, тепловые - в терминах теории теплообмена. Формализация проекта производится с позиции системного подхода и заключается в учете тех или иных факторов, влияющих на функционирование аппаратуры при построении физических моделей.

На основе физических моделей получают математические модели, полученные с использованием математических методов и законов соответствующих наук. Они являются основой для расчета выходных характеристик, проектируемой аппаратуры, а также параметров и факторов, по которым оценивается фактическое состояние схемы или конструкции. В результате расчетов с использованием математических моделей формируется информационная модель устройства, которая включает в себя расчетные значения выходных характеристик, требования технического задания, информацию из технических условий на элементы схемы и конструкции, расчетные значения электрических, тепловых и механических режимов работы элементов, а также показатели, определяющие надежность и качество изделия, множество внутренних параметров схемы и конструкции, которые могут быть управляемыми.

Под множеством управляемых параметров понимается перечень внутренних параметров аппаратуры, которые можно изменять в процессе проектирования, для улучшения выходных характеристик аппаратуры и режимов работы ее элементов.

Путем сопоставления требований ТЗ с расчетными характеристиками, режимов работы элементов с допустимыми режимами, приведенными в технических условиях выявляются те характеристики и режимы работы элементов которые необходимо изменить и на этой основе строится модель чувствительности.

В результате расчета модели чувствительности определяются функции чувствительности, показывающие степень влияния управляемых параметров на выходные характеристики и позволяющие окончательно сформулировать проектные задачи, которые необходимо решить для доработки проекта. Существует три группы проектных задач:

1. Задачи синтеза, расчета и оптимизации структуры и параметров схемы и конструкции.

2. Задачи исследования разбросов параметров вокруг номинальных значений.

3. Задачи обеспечения показателей надежности и качества.

Решение сформулированных проектных задач позволяет внести соответствующие изменения в схему и конструкцию проектируемой аппаратуры и уточнить проект.

Таким образом, из приведенного описания процесса автоматизированного проектирования можно сделать следующие выводы.

1. Процесс проектирования носит итерационный характер так как решения в этом процессе принимаются в условиях отсутствия полной информации, поэтому возникают ситуации когда были приняты не реализуемые, по тем или иным причинам, решения. Их исправление происходит путем повторного выполнения проектных процедур.

2. Процесс проектирования реализуется путем моделирования различных физических процессов, протекающих в аппаратуре при ее функционировании.

Рассмотрим классификацию проектных задач, решаемых в процессе проектирования РЭС.

Задачи синтеза технических объектов направлены на создание новых вариантов проектных решений. Создаваемые в процессе синтеза проектные решения должны быть оформлены на языке оформления проектной документации, например в виде чертежей, схем и пояснительного текста. В этом языке действуют правила, установленные единой системой конструкторской документации (ЕСКД).

Различают задачи структурного и параметрического синтеза. В первом случае синтезируется структура проектируемого объекта, а во втором его параметры.

Задачи анализа технических объектов направлены на изучение их свойств. В процессе анализа не создаются новые объекты, а лишь исследуются заданные.

Решение задачи анализа позволяет получить информацию о выходных характеристиках объекта, режимах работы его элементов, тепловых и механических режимах конструкции и т.д. Необходимо отметить, что часто задачи синтеза решаются путем многократного решения задач анализа.

Решение задачи оптимизации направлено на поиск не любого, а наилучшего, в некотором смысле, проектного решения. Если в процессе оптимизации ищется наилучшая структура, то такую задачу называют структурной оптимизацией, а если при заданной структуре отыскиваются параметры объекта, удовлетворяющие заданному критерию, то такую задачу называют параметрической оптимизацией.

Параметры элементов любого технического объекта не могут иметь точно заданные значения. Это является следствием неизбежных погрешностей технологического оборудования, влияния внешних факторов, разбросов параметров материалов и т.д. Поэтому параметры элементов являются случайными величинами. А это значит, что при серийном производстве каждый экземпляр проектируемой аппаратуры будет иметь случайные значения выходных характеристик.

Другими словами выходные характеристики партии объектов будут лежать в некотором диапазоне. Хорошо если этот диапазон не выходит за рамки регламентируемого в техническом задании. В противном случае, те объекты значения выходных характеристик, выходят за пределы диапазона, регламентируемого техническим заданием, считаются не работоспособными. Учесть влияние разбросов параметров элементов на выходные характеристики и уменьшить это влияние позволяет решение задачи исследования разбросов.

Задача обеспечения надежности направлена на достижение, заданных в техническом задании, показателей надежности. Первая особенность этой задачи заключается в том, что ее решение осуществляется на всех этапах проектирования и при выполнении большинства проектных операций. Вторая особенность заключается в том что решение этой задачи

интегрирует в себе результаты решения практически всех задач анализа характеристик объекта и исследования их разбросов.

Рассмотрим особенности реализации на предприятии CALS-технологий для проектирования сложной радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) на основе современной автоматизированной системы обеспечения надежности и качества аппаратуры «АСОНИКА».

Целью внедрения CALS-технологий на основе автоматизированной системы АСОНИКА является повышение эффективности работы структурных подразделений предприятия, приведение их в соответствие с современными мировыми и отечественными стандартами качества, сокращение сроков проектирования и разработки наукоемкой РЭА, повышение надежности разрабатываемой РЭА. Это достигается путем решения следующих задач:

- создание единой информационной среды для эффективного управления разработкой РЭА;
- возможность подключения к работе любых типов документов, состоящих как из одного, так и из нескольких файлов. Вызов любых приложений для работы с документами;
- автоматизированное создание спецификаций на любой узел проекта;
- возможность использовать типовых элементов и решений в нескольких проектах одновременно;
- интеграция с системами проектирования (AUTOCAD, P-CAD, Компас) и комплексного математического моделирования (АСОНИКА), что позволяет использовать их как единый комплекс для разработки РЭА;
- обеспечение параллельной коллективной работы над проектами разных групп пользователей и различных подразделений предприятия;
- повышение управляемости структурных подразделений предприятия;
- контроль сроков исполнения работ;

- формирование электронного архива и централизованное структурированное хранение электронных документов;
- оперативный поиск, получение и обработка документов и данных;
- защита документов от несанкционированного доступа;
- автоматизация процедуры внесения изменений в рабочую документацию, контроль и регистрация внесения изменений;
- упрощение процедура прохождения сертификации на соответствие требованиям различных международных и отечественных стандартов.

Таким образом, результатом внедрения CALS-технологий на основе современных САПР является переход на принципиально новый уровень информационных технологий, что позволит расширить номенклатуру выпускаемой продукции, сократить сроки выхода на рынок новых изделий, снизить процент отказов аппаратуры и затраты на производство.

Виртуальный макет изделия – это совокупность информации, содержащая структурированные в базе данных сведения об изделии, собранные на стадиях проектирования и систематизированные таким образом, чтобы можно было при просмотре составить достаточно полное о нем представление, включая как внешний вид конструкции, так и его внутренние параметры, режимы работы элементов, и выходные характеристики.

Виртуальный макет изделия дает возможность обращаться с ним, как с материальным оригиналом, а именно: оценивать соответствия параметров и выходных характеристик изделия требования ТЗ, стандартам и другой нормативной документации, а также принимать обоснованные решения для внесения изменений в проектирование изделия с целью

улучшения при оптимизации показателей его качества и надежности.

Виртуальный макет изделия позволяет улучшать показатели процесса проектирования и изготовления такие, как стоимость, сроки и содержание работ на тех или иных этапах.

Одним из эффективных с этой точки зрения решений является замена натуральных испытаний физического макета или опытного образца математическим моделированием. Виртуальный макет изделия формируется при проектировании и в него могут быть внесены изменения на этапах изготовления и эксплуатации в силу реальных условий производства на заводе и эксплуатации на конкретном объекте установки.

Например, при изготовлении может возникнуть необходимость замены материалов и технологических режимов, а при эксплуатации – необходимость получения разрешений на применение в новых условиях эксплуатации, а также на продление времени эксплуатации изделия.

Подобные разрешения дают проектировщики изделий после дополнительного исследования виртуального макета. Поэтому виртуальный макет изделия хранится в головной проектной организации, а на стадии изготовления и эксплуатации передается в электронном виде только часть виртуального макета изделия, относящаяся к технологической или эксплуатационной документации.

Программное обеспечение виртуального макетирования, основанное на современных технологиях виртуальной реальности, позволяет заменить физический макет изделия его виртуальным аналогом и в процессе компьютерного анализа электронного образца решать те задачи, для выполнения которых раньше требовались натурные испытания.

В отличие от физического макета, который может быть изготовлен только после завершения всех этапов проектирования и подготовки производства, виртуальный макет создается сразу после выработки основных требований к изделию.

Таким образом, процесс проектирования нового изделия сопровождается виртуальным макетированием, что позволяет проводить тестирование параллельно с разработкой и тем самым своевременно обнаруживать и исправлять возможные ошибки.

Еще на этапе концептуального проектирования использование виртуального макета позволяет провести анализ альтернативных подходов и выбрать наиболее верное решение.

При конструировании виртуальное макетирование помогает оценить внешние формы частей, их стыковку и согласованность друг с другом в рамках единого изделия. Применение виртуальных макетов повышает наглядность и упрощает процесс управления проектированием изделий в распределенной среде корпоративной сети.

Вся система АСОНИКА, предлагаемая для использования при моделировании РЭА, состоит из ряда проблемных подсистем, позволяющих моделировать большинство основных физических процессов для различных уровней иерархии современной наукоемкой РЭА.

Это такие подсистемы, как: АСОНИКА-У (управление), АСОНИКА-Т (моделирование тепловых процессов), АСОНИКА-М (моделирование механических процессов), АСОНИКА-Р (заполнение карт рабочих режимов) и т. д.

Также в систему включаются программы сторонних разработчиков для обеспечения комплексного анализа физических процессов, протекающих в РЭА, например OrCAD или P-CAD и система управления данными SQL-PDM. Проблемные подсистемы представляют собой отдельные программные комплексы, решающие различные задачи моделирования, управления и подготовки проектной документации.

Рассмотрим основные подсистемы, программы и решаемые ими задачи. PDM – система «SQL\_PDM» - это компьютерная система управления данными об изделии. Назначение SQL\_PDM – собрать всю информацию об изделии в интегрированной базе данных (БД) и обеспечить совместное

использование этой информации в процессах проектирования, производства и эксплуатации. В основе SQL\_PDM лежит международный стандарт ISO 10303 (STEP) (в РФ действует ГОСТ Р ИСО 10303), определяющий схему (модель) данных в БД, набор информационных объектов и их атрибутов, необходимых для описания изделия.

На стадии проектирования БД используется для накопления в стандартизированной форме результатов труда разработчиков и обмена данными между ними.

Подготовленные, проверенные и утвержденные данные используются в процессах материально-технического снабжения, производства и эксплуатации изделия. В соответствии с требованиями стандарта ISO 10303 БД системы SQL\_PDM содержит информацию о виртуальном макете, данные об организационной структуре предприятия и соподчиненности ее элементов, ролях и полномочиях людей, данные о процессе разработки: статусах, присвоенных результатам работы, проведенных изменениях.

Виртуальный макет содержит информацию о структуре, вариантах конфигурации изделия и входимости компонентов в различные изделия, идентификационную информацию об изделии и его компонентах, геометрические модели различных типов и/или электронные образы бумажных документов (чертежей) и все это изображается в виде дерева виртуального макета (см рис. 2.2). Такое отображение позволяет легко найти и извлечь информацию для использования в других работах, принятия проектных решений и т.п. Кроме того БД может содержать ассоциированные с элементами изделия документы, а сами элементы иметь набор функциональных или технических характеристик, измеряемых в различных единицах.

Данные могут попадать в систему различными способами: вводиться вручную или передаваться автоматизированными системами. Аналогично может происходить извлечение и использование данных: от диалогового доступа к данным и визуального просмотра – до

автоматического отбора при помощи прикладных программных систем в задачах материально-технического снабжения, планирования и т.д.

Интегрированная БД предназначена для решения различных задач, связанных с обработкой данных об изделии. Содержание этих задач и роли людей при их решении предполагает множество точек зрения на данные и дисциплин доступа к данным. Например, с точки зрения конструктора изделие имеет несколько вариантов состава (конфигураций), причем в состав входят все компоненты изделия, необходимые для его изготовления.

С точки зрения эксплуатации – в состав изделия входят только те элементы, которые нужно демонтировать для обслуживания или замены. Службу обеспечения качества продукции и эксплуатации могут интересовать физические параметры конкретного экземпляра изделия. Каждая из групп пользователей работает со своими наборами данных, логически увязанными в интегрированную БД.

SQL\_PDM представляет собой трехуровневую информационную систему, состоящую из сервера СУБД (Microsoft SQL Server 2000), сервера приложений и клиентского модуля.

Ниже описывается суть метода формирования виртуального макета изделия с применением комплексного моделирования электрических, тепловых, аэродинамических и механических процессов в РЭА.

Вначале для разработки сложной наукоемкой РЭА необходимо провести концептуальное макромоделирование электрических, тепловых, аэродинамических и механических процессов. При этом рассчитываются: характеристики электрической схемы РЭА, интегральные температуры конструктивных элементов (печатных узлов, стенок, элементов крепления и др.), реакция на вибрационное и ударное воздействие конструктивных элементов (шкафов, блоков и

печатных узлов), скорости потоков хладоносителя (воздуха, воды и др.) внутри конструкции и в плитах охлаждения.

На этих этапах с помощью подсистемы АСОНИКА-П может быть получена вся информация об электрических характеристиках, тепловых и механических режимах работы РЭА, необходимая для расчёта надёжности. Полученные результаты заносятся в PDM-систему «SQL\_PDM» и являются основой для принятия решения о конструктивном и схмотехническом исполнении разрабатываемого РЭА.

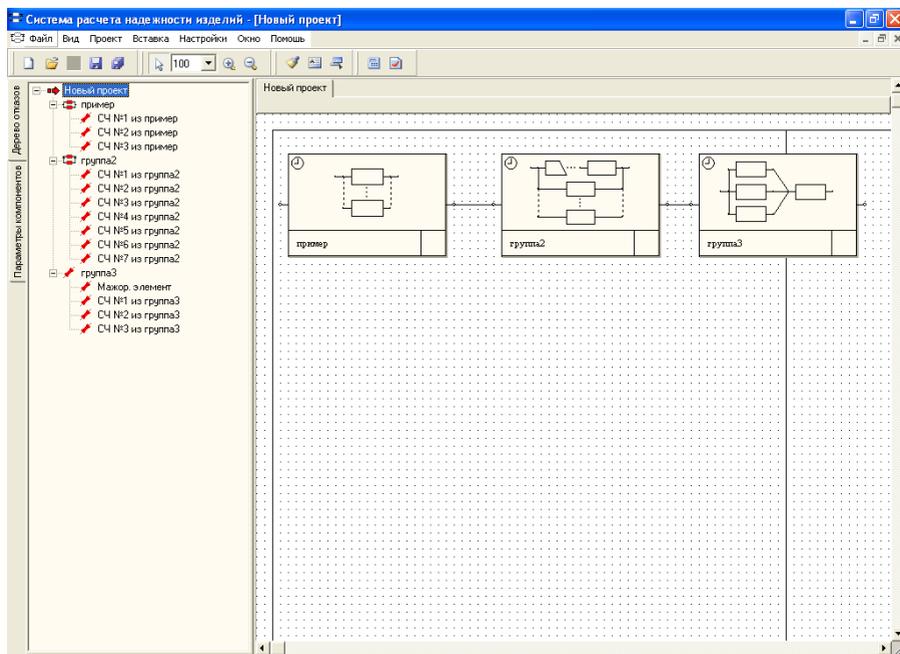


Рис. 2.1. Интерфейс подсистемы АСОНИКА-К

Затем на основе полученных режимов работы проводится анализ надежности последовательно соединенных составных

частей на уровне шкафов, блоков и печатных узлов с учетом результатов, полученных при концептуальном моделировании (см. рис. 2.1).

На основе полученных результатов формируются частно-технические задания на составные части и эти требования учитываются при дальнейших этапах комплексного моделирования.

Далее необходимо проанализировать исследуемую РЭА с точки зрения электрических процессов в схеме с помощью программ P-CAD или OrCAD с учетом температур ЭРЭ. На начальных этапах задается интегральная температура печатного узла, полученная при концептуальном моделировании с помощью подсистемы АСОНИКА-П.

Исходные данные для расчета начиная от ТЗ заканчивая исходными файлами для расчета разработчик берет из PDM-системы «SQL\_PDM», которая формирует виртуальный макет разрабатываемой РЭА.

Известно, что в состав разрабатываемого РЭА входит один или несколько функциональных узлов, поэтому необходимо провести анализ электрического режима каждого функционального узла с учетом предполагаемой или взятых из виртуального макета температур ЭРЭ, полученных при тепловом расчете.

Затем необходимо выяснить, все ли электрические режимы каждого функционального узла соответствуют требованиям технического задания. Если требование не выполняется, то вносятся изменения в схему функционального узла и проводится повторный электрический анализ.

Если требование выполняется и получены все необходимые результаты электрических расчетов, необходимо сформировать промежуточные карты электрических режимов работы ЭРЭ функциональных узлов, входящих в состав разрабатываемого РЭА и поместить эти результаты в виртуальный макет. В картах рабочих режимов указываются токи, напряжения и мощности, выделяемые в ЭРЭ, которые

будут впоследствии использованы при тепловом моделировании функционального узла.

На втором шаге комплексного моделирования требуется проанализировать блок с точки зрения тепловых процессов (см. рис. 2.2) с учетом мощностей тепловыделений, полученных из предыдущего электрического моделирования РЭА и находящихся в виртуальном макете РЭА или, если на начальных этапах, то с учетом мощностей тепловыделений, полученных при концептуальном моделировании и также хранящихся в виртуальном макете.

Файл с рассчитанными мощностями тепловыделений выгружается из виртуального макета и с помощью конвертера, связывающего программу электрического анализа и подсистему АСОНИКА-Т эти мощности учитываются в модели тепловых процессов. Таким образом, формируется МТП блока (блоков) в составе каждого шкафа и проводится расчет. В результате получают температуры стенок блока и температуры печатных узлов (ПУ), составляющих блок. Эти температуры вместе с результирующим файлом заносятся в виртуальный макет РЭА и в дальнейшем учитываются при аэродинамическом моделировании блока и тепловом моделировании ПУ.

На третьем шаге в конструкции выявляются аэродинамические каналы и другие различные фрагменты, необходимые для построения аэродинамической модели и если они существуют, строится полная аэродинамическая модель исследуемой конструкции с помощью подсистемы АСОНИКА-А. При описании аэродинамических сопротивлений в каналах необходимо задать температуру воздуха на входе в канал и температуру стенок канала. Эти температуры, полученные при тепловом моделировании блока, находятся в виртуальном макете. Разработчик выгружает результирующие файлы теплового расчета из виртуального макета и с помощью конвертера данных из АСОНИКА-Т в АСОНИКА-А автоматизировано добавляет эти температуры в аэродинамическую модель.

В результате аэродинамического моделирования получаются значения скоростей воздуха (воды, другого жидкого вещества) у стенок блока и у поверхностей ЭРЭ. Полученные значения скоростей таким же способом, что и из АСОНИКА-Т в АСОНИКА-А передаются тепловым ветвям МТП блока (вынужденной конвекции и массопереноса) и повторяется тепловой расчет.

На четвертом шаге комплексного моделирования требуется проанализировать исследуемую конструкцию с точки зрения механических процессов при воздействии ударов, линейных ускорений, вибраций и акустических шумов с учетом температур, полученных из теплового моделирования блока, которые разработчик берет из виртуального макета РЭА. В результате расчета с помощью подсистемы АСОНИКА-М получаются линейные ускорения блока, которые разработчик сохраняет в виртуальном макете и эти данные будут являться граничными условиями для расчета на механические воздействия ПУ.

Далее на основе граничных условий, полученные из теплового расчета блока, МТП каждого ПУ, входящего в блок, происходит автоматическое формирование модели конвертированием размеров и координат ЭРЭ из системы размещения и трассировки печатных плат, например, P-CAD, в подсистему АСОНИКА-ТМ, т.е. разработчик выгружает из виртуального макета итоговый файл программы P-CAD и при помощи конвертера, связывающего P-CAD и АСОНИКА-ТМ, формируется геометрия модели механических процессов.

В результате теплового моделирования всех ПУ получаются их температурные поля и температуры всех ЭРИ, расположенных на ПУ РЭА. Эти температуры ЭРИ сохраняются в виртуальном макете РЭА и при помощи конвертера передаются в электрические модели для коррекции параметров ЭРИ и затем осуществляется очередной итерационный шаг электрического моделирования. Эти итерации повторяются до тех пор, пока полученные электрические и тепловые режимы

ЭРЭ не будут удовлетворять требованиям технических условий на ЭРЭ.

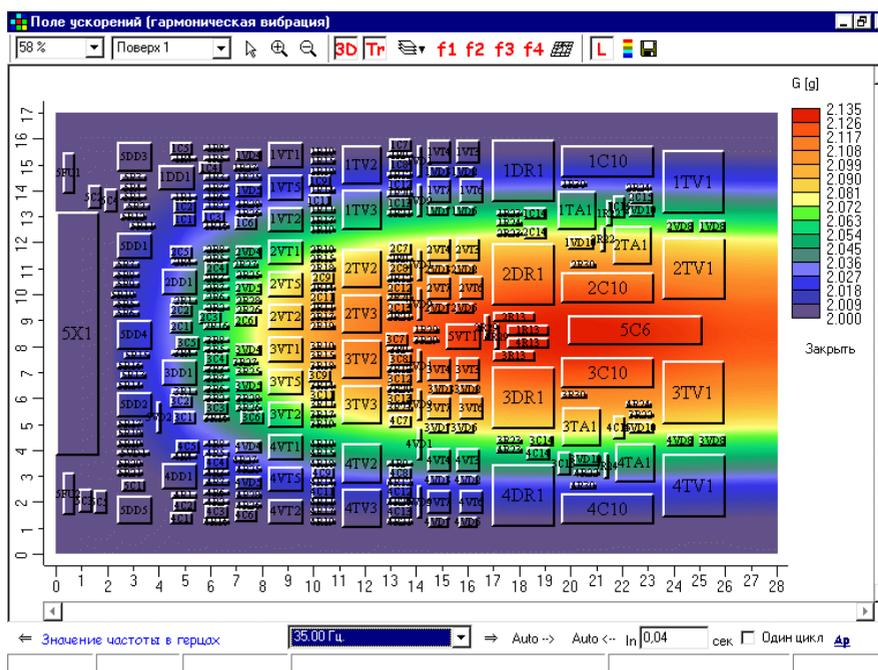


Рис. 2.2. Поле максимальных виброускорений по плате при гармонической вибрации

Для расчета ПУ на механические воздействия применяется подсистема АСОНИКА-ТМ. При расчете необходимо из виртуального макета взять результирующий файл расчета, полученный из АСОНИКА-М, и с помощью конвертера данных в модель заносятся граничные условия. Температуры всех ЭРИ, расположенных на ПУ, и средняя температура всего ПУ берутся из виртуального макета РЭА в виде результирующего файла

подсистемы АСОНИКА-Т, который является исходным для проведения механического моделирования ПУ.

После проведения комплексного расчета на пятом шаге необходимо оценить надежность проектируемого РЭА.

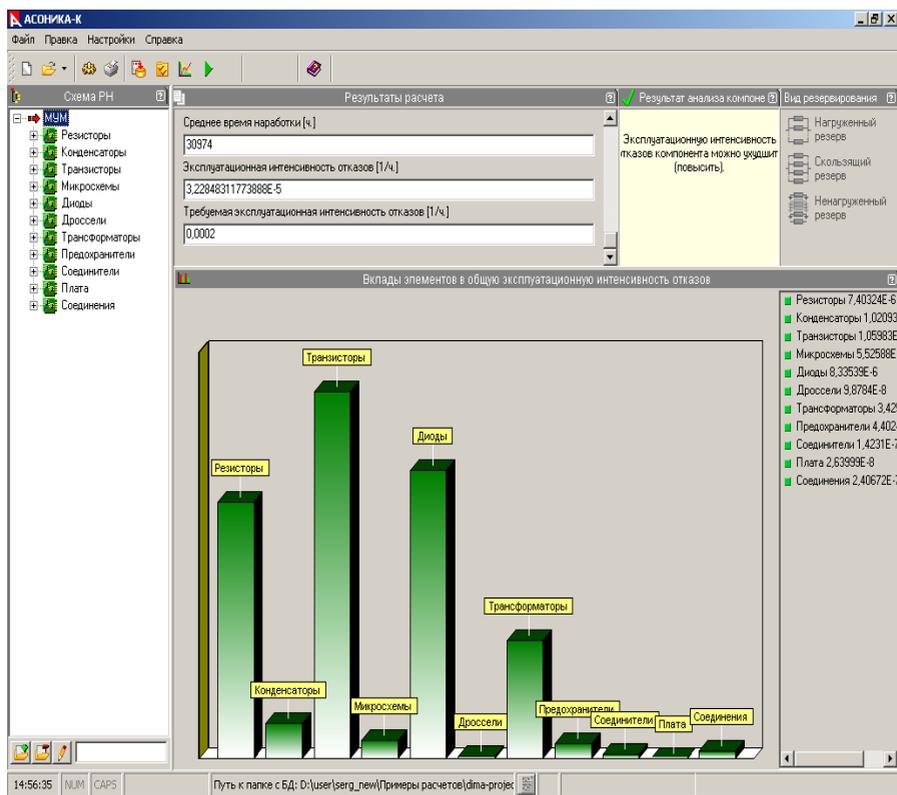


Рис. 2.3. ПК АСОНИКА-К: Интерфейс пользователя

При расчете надежности необходимо учитывать температуры ЭРИ, полученные при моделировании тепловых процессов в ПУ и уточненные после аэродинамического моделирования, и ускорения ЭРИ, полученные из моделирования механических процессов в ПУ и уточненные

после теплового моделирования блока. Эти данные берутся из виртуального макета и при помощи конвертера, связывающих АСОНИКА-К с АСОНИКА-ТМ добавляются в расчет надежности разрабатываемой РЭА.

Результаты расчета надежности разработчик сохраняет в виртуальном макете разрабатываемой РЭА. После удовлетворения всех результатов, полученных при расчетах, техническому заданию, на шестом шаге разработчик заполняет карты рабочих режимов всех рассчитанных ПУ с помощью подсистемы АСОНИКА-Р, т.е. разработчик выгружает из виртуального макета результирующие рассчитанные файлы и конвертируя данные из электрических, тепловых и механических результатов расчета заносит в карты рабочих режимов, которые затем заносятся в виртуальный макет.

Практический эффект применения метода комплексного моделирования и формирование на его базе виртуального макета РЭА заключается в повышении точности моделирования (на 30 % - 50 %) и соответственно точности расчетов и надёжности проектных решений.

За счет уменьшения количества изменений в проекте, вносимых в процессе комплексного моделирования, происходит снижение сроков и трудоемкости проектирования РЭА на 60%. Повышение точности результатов при комплексном моделировании позволяет выявить системные отказы РЭА, которые не выявляются при раздельном моделировании электрических, тепловых, аэродинамических и механических процессов.

Данная методика является базовой концепцией выполнения проектно-конструкторских работ по созданию сложной наукоемкой РЭА на радиотехническом предприятии.

### 3. ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Проектирование качественных изделий радиоэлектроники требует исследования физических процессов различной природы, протекающих в конструкциях РЭС, включая анализ электрических, магнитных, тепловых полей, а также механических полей нагрузок и деформаций.

Математически задачи анализа полей в конструкциях РЭС формулируются в виде дифференциальной краевой задачи (ДКЗ) следующим образом.

Дифференциальное уравнение имеет вид

$$Lu = f, \quad (3.1)$$

где  $L$  - дифференциальный оператор,

$u = u(X, t)$  - функция потенциала (неизвестная функция - решение ДКЗ, характеризующая исследуемое поле: например, в случае электростатического поля это разность потенциалов, для магнитного поля - векторный потенциал, для теплового поля - температура и т.п.),  $f = f(X, t)$  - заданная функция, характеризующая воздействие внешних факторов,  $X$  - набор параметров, характеризующих размерность ДКЗ или пространственные координаты (в одномерном случае  $X = x$  (стержень), в двумерном  $X = (x, y)$  (плоская конструкция), в трехмерном -  $X = (x, y, z)$  (объемная конструкция)),  $X \in \Omega$  ( $\Omega$  - область определения ДКЗ, соответствующая конфигурации исследуемой конструкции),  $t$  - временной фактор,  $t \in [t_0, \infty)$ ,  $t_0$  - время начала моделирования.

Граничные условия задают на границе конструкции или ее отдельных участках:

$$u|_{\Gamma} = \psi, \quad (3.2)$$

где  $\Gamma$  - граница области определения ДКЗ  $\Omega$  ( $\Gamma = \partial\Omega$ ),  $\Psi = \Psi(t)$  - заданная функция, характеризующая распределение поля на границе конструкции.

В начальный момент времени моделирования  $t_0$  задаются начальные условия

$$u|_{t=t_0} = \varphi, \quad (3.3)$$

где  $\varphi = \varphi(X)$  - заданная функция, характеризующая состояние поля в начальный момент времени  $t = t_0$ .

Дифференциальная краевая задача является нестационарной (то есть учитывает изменения параметров поля во времени). В стационарном случае ( $u \neq u(t)$ ) ДКЗ имеет вид

$$\begin{aligned} Lu(x) &= f(x), \\ u(x)|_{\Gamma} &= \psi(x) \end{aligned} \quad (3.4)$$

и не содержит начальных условий. Начальные и граничные условия ДКЗ принято называть краевыми условиями.

Решить задачу анализа поля (3.4) значит найти функцию потенциала поля  $u$ , удовлетворяющую дифференциальному уравнению и краевым условиям.

Аналитическое решение данной задачи представляет собой сложную проблему, прежде всего из-за конфигурации области определения  $\Omega$  (наличие разнообразных вырезов и отверстий ПП), а также в силу того, что граничные условия, как правило, задаются на отдельных участках границы или даже на фрагментах внутренней области конструкции (например, для расчета теплового поля такие участки соответствуют местоположению теплонагруженных элементов).

В таком случае даже при простейшем дифференциальном уравнении нахождение аналитического (в виде явной функциональной зависимости) решения ДКЗ не представляется

возможным. Поэтому на практике используют численные методы анализа полей в конструкциях РЭС - метод конечных разностей и метод конечных элементов.

Метод конечных элементов, который широко применяется в современных системах 3D моделирования, в отличие от метода конечных разностей позволяет получить решение в аналитическом виде, но не позволяет произвести строгой количественной оценки точности полученного решения.

Основная идея метода конечных элементов заключается в разложении искомого решения ДКЗ (неизвестной функции  $u(x)$ ) по базисным функциям  $S_1(x), \dots, S_N(x)$ , где  $N$  - число узлов разбиения конструкции)

$$u(x) = \sum_{i=1}^N \alpha_i S_i(x) \quad (3.5)$$

где  $\alpha_i$  - коэффициенты разложения, которые требуется найти.

Такое разложение можно рассматривать как аналогию разложения произвольного вектора в векторном пространстве  $R^3$  по единичным ортам (базисным векторам), то есть так же как в векторном пространстве любой вектор можно представить в виде линейной комбинации базисных векторов, так в функциональном пространстве любую функцию можно представить в виде (3.5).

Рассмотрим основные этапы метода конечных элементов.

1. Разбиваем конструкцию РЭС или ее отдельный участок на конечные элементы (в одномерном случае при  $u = u(x)$  конечный элемент – это отрезок, в двумерном случае  $u = u(x, y)$  - треугольник, в трехмерном - пирамида или куб).

Полученные конечные элементы объединяют в "ансамбль", то есть вводят сквозную нумерацию для вершин всех конечных элементов.

Обозначим  $N$  общее число вершин конечных элементов.

В результате получаем сеточное разбиение исследуемой области.

Некоторые виды таких разбиений приведены на рис. 3.1.

2. В каждом из узлов конечных элементов (узлов сетки) построим базисную функцию.

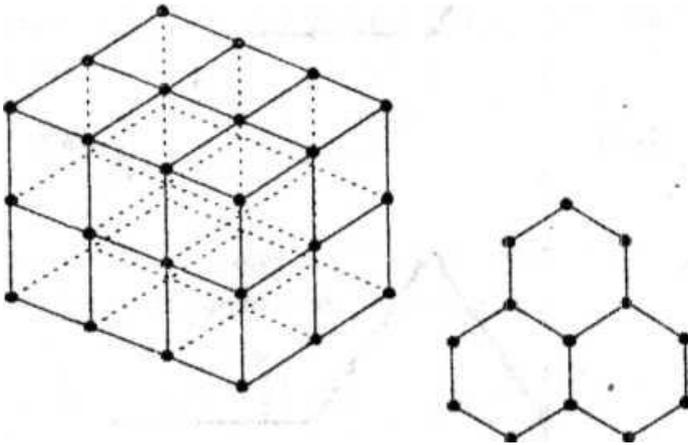


Рис. 3.1. Примеры видов сеточного разбиения

Базисная функция  $S_i(x)$  – это полином (обычно первой степени, то есть линейная функция), обладающая следующим свойством: базисная функция  $S_i(x)$  равна единице только в  $i$ -ом узле сетки, а в остальных узлах равна нулю (для ясности и простоты изложения ограничимся рассмотрением одномерного случая):

$$S_i(x) = \begin{cases} 1, & x = x_i \\ 0, & x \neq x_i \end{cases}$$

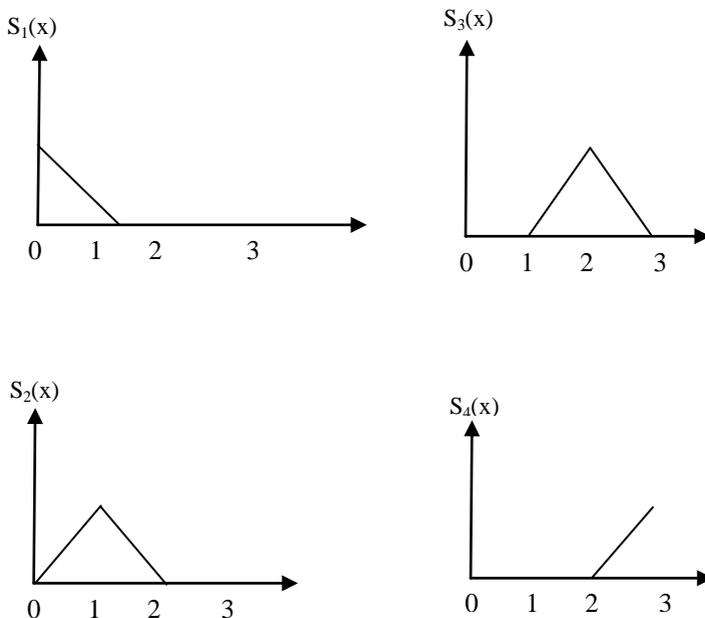


Рис. 3.2. Разбиение отрезка и графики базисных функций

В качестве примера рассмотрим отрезок  $[0, 3]$ , выбрав шаг сетки  $h = 1$ , тогда  $N = 4$  (три конечных элемента, четыре вершины).

Разбиение отрезка и графики базисных функций приведены на рис. 3.2.

Из определения базисной функции с учетом того, что  $S_i(x)$  - полином первого порядка ( $S_i(x) = ax+b$ ) легко найти базисные функции:

$$S_1(x) = \begin{cases} -x+1, & x \in [0, 1] \\ 0, & x \in [1, 3] \end{cases}$$

$$S_2(x) = \begin{cases} x, x \in [0, 1] \\ -x + 2, x \in [1, 2] \\ 0, x \in [2, 3], \end{cases}$$

$$S_3(x) = \begin{cases} 0, x \in [0, 1] \\ x - 1, x \in [1, 2] \\ -x + 3, x \in [2, 3], \end{cases}$$

$$S_4(x) = \begin{cases} 0, x \in [0, 2] \\ x - 2, x \in [2, 3]. \end{cases}$$

3. Требуется найти коэффициенты разложения (3.4)  $\alpha_1, \dots, \alpha_N$  (базисные функции  $S_1(x), \dots, S_N(x)$  к данному моменту уже известны, в нашем примере  $N=4$ ).

Для этого выпишем дифференциальное уравнение краевой задачи, умножим обе его части на произвольную функцию  $U(x)$  и проинтегрируем обе части уравнения по области определения (в одномерном случае  $\Omega = [a, b]$ ):

$$\int_a^b U(x) \cdot Lu(x) dx = \int_a^b U(x) f(x) dx \quad (3.5')$$

Затем подставим в уравнение (3.5') вместо  $u(x)$  разложение (3.4), а в качестве  $U(x)$  выберем первую из базисных функций ( $U(x)=S_1(x)$ ):

$$\int_a^b S_1(x) \cdot L(\sum_{i=1}^N \alpha_i S_i(x)) dx = \int_a^b S_1(x) \cdot f(x) dx \quad (3.6)$$

где  $S_i(x)$ ,  $i = 1, \dots, N$  - известные линейные функции,

$f(x)$  - заданная правая часть ДКЗ,

$\alpha_i$  - неизвестные коэффициенты (константы),

следовательно, под знаком интеграла стоят полиномы не выше второго порядка, вычисление интегралов в таком случае не представляет серьезной проблемы, причем в ходе вычислений учитываются граничные условия. В результате вычисления интегралов в формуле (3.6) получим первое линейное уравнение относительно неизвестных коэффициентов  $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N$ .

Чтобы получить второе уравнение, в (4.42) подставим  $U = S_2(x)$  и проведем интегрирование, и т.д.

Для получения последнего уравнения в (3.5) подставляем  $U = S_N(x)$ . Таким образом, получена система из  $N$  линейных уравнений относительно  $N$  неизвестных (коэффициентов  $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N$ ). Решив полученную систему на ЭВМ и подставив найденные значения  $\alpha_i$ ,  $i = 1, \dots, N$  в формулу (3.4) получим искомое решение  $u(x)$  ДКЗ.

В нашем примере необходимо найти коэффициенты  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$  разложения

$$u(x) = \alpha_1 \cdot S_1(x) + \alpha_2 \cdot S_2(x) + \alpha_3 \cdot S_3(x) + \alpha_4 \cdot S_4(x) \quad (3.7)$$

решения следующей полевой задачи.

Провести анализ теплового поля в одномерном стержне длины  $l=3$ ; к левому концу стержня подводится тепловой поток интенсивности  $q$ , а правый конец стержня теплоизолирован (коэффициент теплопроводности стержня  $\mu_x$ ):

$$\frac{d^2 U(x)}{dx^2} = 0, x \in (0, l), l = 3$$

$$\mu_x \frac{dU(0)}{dx} + q = 0, \quad (3.8)$$

$$\frac{dU(3)}{dx} = 0,$$

Для данной задачи разбиение отрезка  $[0, 3]$  с шагом  $h = 1$  и базисные функции  $S_1(x)$ ,  $S_2(x)$ ,  $S_3(x)$ ,  $S_4(x)$  приведены в пункте 2 данного алгоритма.

Подставим выражения, полученные для базисных функций, в формулу (3.7):

$$\left\{ \begin{array}{ll} \alpha_1(-x+1) + \alpha_2 x + \alpha_3 \cdot 0 + \alpha_4 \cdot 0, & x \in [0, 1] \\ u(x) = \alpha_1 \cdot 0 + \alpha_2(-x+2) + \alpha_3(x-1) + \alpha_4 \cdot 0, & x \in [1, 2] \\ \alpha_1 \cdot 0 + \alpha_2 \cdot 0 + \alpha_3(-x+3) + \alpha_4(x-3), & x \in [2, 3]. \end{array} \right.$$

Умножая обе части дифференциального уравнения ДКЗ (3.8) последовательно на каждую из базисных функций  $S_1(x)$ ,  $S_2(x)$ ,  $S_3(x)$ ,  $S_4(x)$ , интегрируя их по области определения ( $x \in [0, 3]$ ) получим четыре интегро-дифференциальных уравнения.

Вычислив интегралы с применением формулы интегрирования по частям, получим систему уравнений для нахождения коэффициентов  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\alpha_3$ ,  $\alpha_4$ :

$$\begin{aligned}
\alpha_1 - \alpha_2 &= q/\mu_x, \\
\alpha_1 - 2\alpha_2 + \alpha_3 &= 0, \\
\alpha_2 - 2\alpha_3 + \alpha_4 &= 0, \\
\alpha_3 - \alpha_4 &= 0.
\end{aligned}
\tag{3.9}$$

Полученную систему линейных алгебраических уравнений решают на ЭВМ, так как на практике целесообразно для достижения хорошей точности решения выбирать возможно меньший шаг разбиения  $h$ , и получаемые в методе конечных элементов системы имеют большую размерность.

#### Вопросы и задания к разделу

1. Дайте общую характеристику математической постановки задач анализа полей в конструкциях РЭС
2. Приведите пример полевой задачи по теме магистерской диссертации
3. Чем вызвана необходимость применения численных методов?
4. Обоснуйте выбор типа элемента разбиения в методе конечных элементов
5. Постройте базисные функции в узлах конечного элемента (треугольник) с заданными координатами вершин (вариант получить у преподавателя).

6. Приведите общий вид решения полевой задачи, которое можно получить с помощью метода конечных элементов
7. Постройте систему линейных алгебраических уравнений для нахождения коэффициентов разложения решения по базисным функциям (вариант получить у преподавателя).
8. Оцените точность полученного решения в методе конечных элементов
9. Какие системы автоматизированного проектирования электронных средств используют метод конечных элементов
10. Проведите анализ качества решения полевой задачи по теме магистерской диссертации, выполненной в выбранной программной среде

#### 4. МЕТОДЫ ПОЛНОГО И СОКРАЩЁННОГО ПЕРЕБОРА НА ИЕРАРХИЧЕСКОМ ДЕРЕВЕ РЕШЕНИЙ

В конструкторском проектировании выделяют три группы задач [95]: синтез конструкции; контроль полученных конструктивных решений; оформление конструкторской и технологической документации. Рассмотренные традиционные САПР в основном решают задачи последних двух групп. Что касается задач первой группы, то в большинстве современных САПР РЭС решение задач синтеза сводится к решению следующих коммутационно-монтажных задач:

- компоновка конструктивов  $(i - 1)$  - го в конструктивы  $i$  - го уровня (компоновка простейших функциональных элементов логических схем И, ИЛИ, НЕ в корпуса микросхем (покрытие и типизация), компоновка интегральных микросхем (ИМС) и других электрорадиоэлементов (ЭРЭ) в ячейки, ячеек в блоки и устройства);

- размещение конструктивов  $(i - 1)$  - го уровня в конструктивах  $i$  - го уровня (размещение цифровых аналоговых бескорпусных ИМС на подложке гибридной интегральной схемы, размещение ЭРЭ на печатной плате, размещение ячеек в блоке и т. д.);

- трассировка монтажных соединений между конструктивами на всех уровнях (соединение между кристаллами ИМС, печатный монтаж, межплатные соединения).

Понятие структуры объекта проектирования (конструкции РЭС либо технологического процесса) является базовым при реализации блочно-иерархического подхода к проектированию. Под "структурой" понимают представление объекта проектирования в виде совокупности взаимосвязанных элементов.

Рациональный выбор структуры во многом определяет качество проектируемого изделия. Для выполнения проектной

процедуры синтеза структуры объекта проектирования необходимо, прежде всего, необходимо определить перечень вариантов структуры, а затем, по возможности, оценить каждым из полученных вариантов и выбрать наилучшее решение.

Для задания множества всех возможных вариантов структуры объекта проектирования используют иерархическое дерево решений.

Пусть, например, изделие состоит из трех модулей, и его структура приведена на рис. 4.1.



Рис. 4.1. Пример трехмодульной структуры изделия

Если первый блок может быть реализован одним из двух способов второго блока - три варианта исполнения, а у третьего блока - два варианта реализации. Тогда все возможные варианты структуры изделия описываются иерархическим деревом решений, приведенным на рис. 7.2.

Каждому варианту структуры в иерархическом дереве решений соответствует полная цепь, то есть маршрут от корневой вершины до вершины нижнего уровня, составленный из ветвей дерева решений (ребер графа, соединяющих вершины различных уровней).

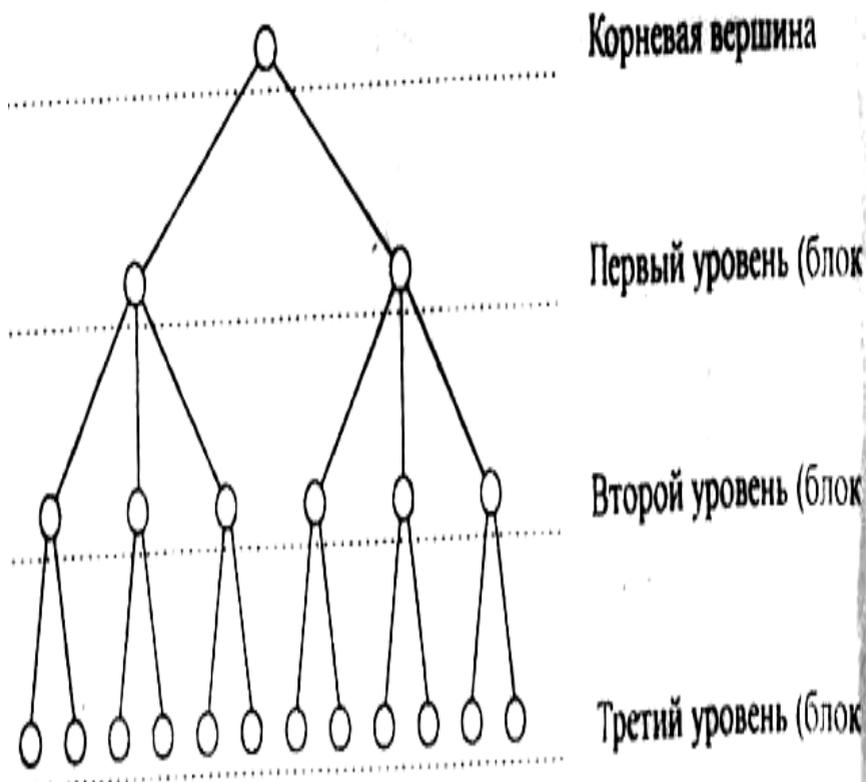


Рис. 4.2. Иерархическое дерево решений

Каждый из вариантов структуры конструкции или технологии РЭС оценивают с помощью одного или нескольких критериев качества, при этом должны быть заданы соответствующие математические модели для расчета данных критериев.

При этом сравнивать различные варианты структуры можно только по экстремальным значениям критериев качества, определяемым по результатам параметрической оптимизации (оптимальный набор значений параметров может оказаться различным для различных вариантов структуры).

Например, пусть имеются два варианта структуры некоторого объекта проектирования.

Каждому варианту структуры соответствует своя математическая модель для расчета критериев качества: для 1-го варианта  $K(X) = S_1(X)$ , где  $X = (x_1, \dots, x_n)$  - набор внутренних параметров изделия; для 2-го варианта структуры  $K(X) = S_2(X)$ . Графики данных моделей приведены на рис. 7.3.

Если лучшим считается изделие с минимальным значением критерия качества  $K(X) \rightarrow \min$  (например, если  $K(X)$  - стоимость, трудоемкость и т.д.), то лучшим считается вариант структуры  $S_1(X)$ .

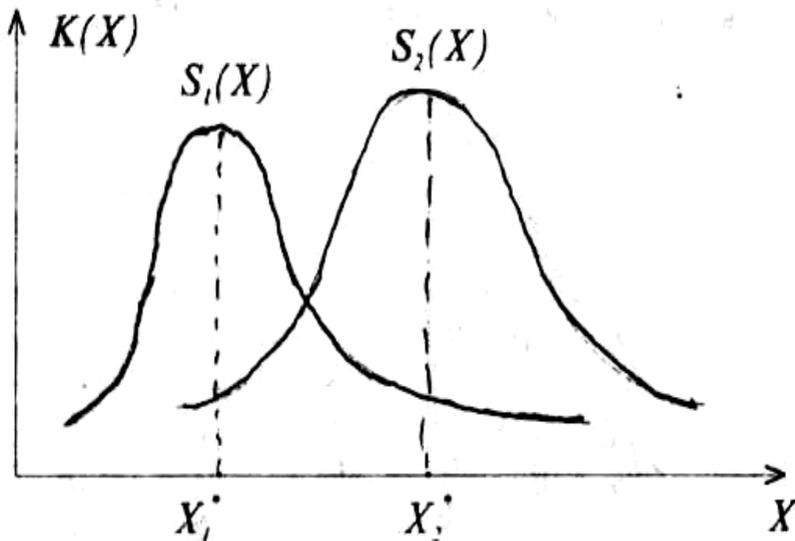


Рис. 4.3

Поиск по-настоящему оптимального варианта структуры объекта проектирования предполагает проведение полного перебора всех вариантов структуры (всех полных цепей в дереве решений).

Однако при проектировании сложных систем, состоящих из большого числа взаимосвязанных элементов, рассмотрение всех возможных вариантов структуры, даже с у том вычислительных возможностей ЭВМ, практически невозможно.

Поэтому на практике используют методы сокращенного перебора, позволяющие исключить из рассмотрения часть неперспективных (с точки зрения улучшения критерия качества) вариантов структуры.

При этом, естественно, появляется риск исключить из рассмотрения по-настоящему оптимальное решение. Успех применения каждого из методов сокращенного перебора в большой степени зависит от удачного выбора моделей и алгоритмов оценки качества вариантов структуры.

На практике методы полного сокращенного перебора используют три типа поиска наилучшего решение помощью иерархического дерева решений: поиск с возвратением, поиск в глубину и поиск в ширину.

Поиск в глубину на дереве решений состоит в том, чтобы в каждой исследуемой вершине дерева выбирать один из возможных путей (одну из ветвей, связывающих данную вершину с вершинами следующего, более низкого, уровня иерархии) до получения полной цепи, то есть окончательного варианта структуры.

При этом другие возможные ветви не рассматриваются, пока сохраняется возможность получения решения, исследуя выбранную цепь.

Дерево поиска в глубину изображено на рис. 4.4. Основное достоинство метода поиска в глубину заключается в том, что поиск в основном может быть реализован за время  $O(n)$ , где  $n$  - количество вершин дерева.

Основной недостаток заключается в том, что большой вероятностью можно пройти мимо той ветви, на которой раньше всего появляется окончательное решение.

Поиск в ширину происходит от уровня к уровню, причем переход к рассмотрению вершин следующего уровня происходит только после рассмотрения всех вершин данного уровня (рис. 4.5).

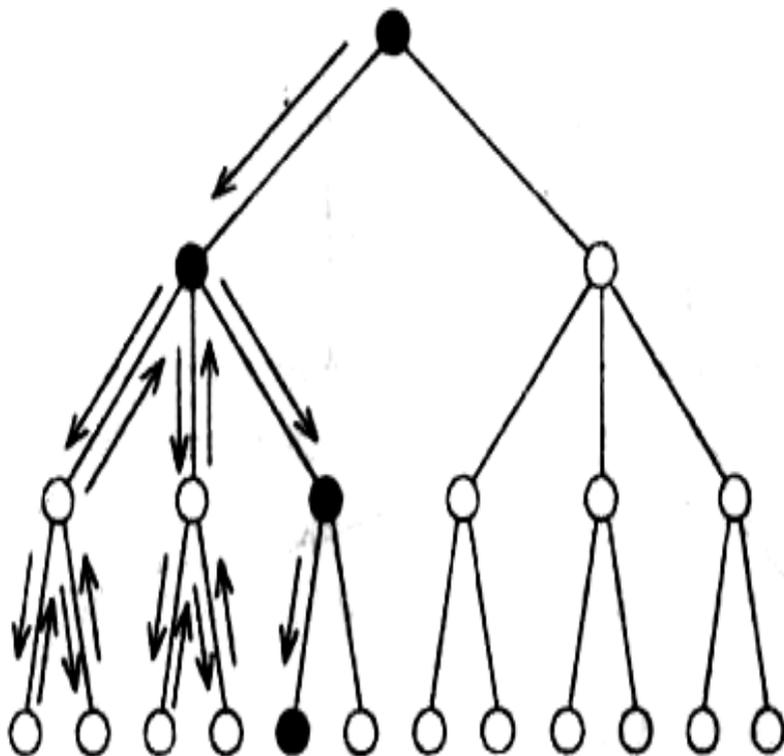


Рис. 4.4

Алгоритмы поиска в ширину в основном реализуются за время  $O(n^2) - O(n^4)$ .

Поиск с возвратом характеризуется следующей особенностью: после получения варианта решения (полной цепи иерархического дерева) методом поиска в глубину производится возврат на ближайший из предыдущих уровней,



Наиболее перспективным в конструкторском проектировании является метод ветвей и границ, обеспечивающий сокращение рассматриваемых вариантов структуры.

При конструкторском проектировании РЭА (радиоэлектронной аппаратуры) решаются задачи, связанные с поиском наилучшего варианта конструкции, удовлетворяющего требованиям технического задания и максимально учитывающего возможности технологической базы производства.

Тесная взаимосвязанность задач и большая размерность каждой из них обычно не позволяет предложить метод поиска оптимального конструктивного решения в едином цикле в связи с трудностями создания общей математической модели, комплексно учитывающей особенности конструкторско-технологической базы производства.

Поэтому разработка и реализация алгоритмов и методов решения отдельных задач этапа конструкторского проектирования: компоновки, размещения и трассировки, до сих пор остаются актуальными проблемами, решение которых неотъемлемо связано с развитием систем автоматизации проектирования.

На этапе конструкторского проектирования решаются вопросы, связанные с компоновкой элементов логической схемы в модули, модулей в ячейки, ячеек в панели и т. д. Эти задачи в общем случае тесно связаны между собой, и их решение позволяет значительно сократить затраты и трудоемкость указанного этапа в САПР.

Обычно задачи компоновки рассматриваются как процесс принятия решений в определенных или неопределенных условиях, в результате выполнения которого части логической схемы располагаются в конструктивных элементах  $i$ -го уровня, а эти элементы размещаются в конструктивных элементах  $(i+1)$ -го уровня и т.д., причем расположение выполняется с оптимизацией по выбранному критерию.

*Компоновкой электрической схемы* РЭА на конструктивно законченные части называется процесс распределения элементов низшего конструктивного уровня в высший в соответствии с выбранным критерием. На этапах размещения и трассировки используют одни и те же критерии качества:

- минимум суммарной длины соединений;
- минимальная длина самого длинного соединения;
- минимум числа пересечения проводников;
- минимум числа изгибов проводников;
- минимальное прижатие проводника к ранее приложенным соединениям;
- минимум числа слоев;
- минимум числа переходов из слоя в слой.

Таким образом, задача размещения элементов на ПП является многокритериальной.

Исходными данными в задаче размещения являются:

- коммутационная схема (КС) РЭС, задающая связи между ее элементами (в виде матрицы смежности мультиграфа КС  $\hat{R}^M$ , задающей число связей между парами элементов схемы);
- коммутационное поле ПП, разбитое на ячейки одинакового размера (размещение одногабаритных элементов) в виде матрицы длин  $\hat{D}$ , задающие попарные расстояния между центрами позиций коммутационного поля.

В качестве главного критерия обычно выбирают минимум суммарной длины соединений, поэтому задачу размещения как задачу структурного синтеза формулируют следующим образом: требуется разместить элементы схемы РЭС в позиции коммутационного поля так, чтобы суммарная длина соединений была минимальной.

Для построения формальной математической модели компоновочных задач удобно использовать теорию графов. При этом электрическую схему интерпретируют ненаправленным

мультиграфом, в котором каждому конструктивному элементу (модулю) ставят в соответствие вершину мультиграфа, а электрическим связям схемы – его ребра.

Тогда задача компоновки формулируется следующим образом. Задан мультиграф  $G(X, U)$ . Требуется “разрезать” его на отдельные куски  $G1(X1, U1)$ ,  $G2(X2, U2)$ , ...,  $Gk(Xk, Uk)$  так, чтобы число ребер, соединяющих эти куски, было минимальным, т.е.

минимизировать  $\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k U_{i,j}, i \neq j$ , где  $U_{ij}$  – множество ребер, соединяющих куски  $Gi(Xi, Ui)$  и  $Gj(Xj, Uj)$ .

Другими словами разбиениями частей совокупности  $G$  на графы считаются, если любая часть из этой совокупности не пустая; для любых двух частей пересечение множества ребер может быть не пустым; объединение всех частей в точности равно графу  $G$ .

Известные алгоритмы компоновки можно условно разбить на четыре группы:

- алгоритмы, использующие методы целочисленного программирования;
- последовательные алгоритмы;
- итерационные алгоритмы;
- смешанные алгоритмы.

Алгоритмы первой группы хотя и позволяют получить точное решение задачи, однако для устройства реальной сложности фактически не реализуемы на ЭВМ.

В последнее время наибольшее распространение получили приближенные алгоритмы компоновки (последовательные, итерационные, смешанные).

При использовании последовательных алгоритмов сначала по определенному правилу выбирают вершину графа, затем осуществляют последовательный выбор вершин (из числа нераспределенных) и присоединение их к формируемому куску графа.

После образования первого куска переходят ко второму и т. д. до получения желаемого разрезания исходного графа. В итерационных алгоритмах начальное разрезание графа на куски выполняют произвольным образом; оптимизация компоновки достигается парными или групповыми перестановками вершин графа из различных кусков.

Процесс перераспределения вершин заканчивают при получении локального экстремума целевой функции, удовлетворяющим требованиям разработчика.

В смешанных алгоритмах компоновки для получения начального варианта “разрезания” используется алгоритм последовательного формирования кусков; дальнейшая оптимизация решения осуществляется перераспределением вершин между отдельными кусками графа.

В последовательных алгоритмах компоновки «разрезание» исходного графа  $G(X,U)$  на куски  $G1(X1,U1)$ ,  $G2(X2,U2)$ , ...,  $Gk(Xk,Uk)$  сводится к следующему. В графе  $G(X,U)$  находят вершину  $x_i \in X$  с минимальной локальной степенью  $p(x_i) = \min p(x_j)$ .

Если таких вершин несколько, то предпочтение отдают вершине с максимальным числом кратных ребер. Из множества вершин, смежных с вершинами формируемого куска графа  $G1(X1,U1)$ , выбирают ту, которая обеспечивает минимальное приращение связей куска с еще нераспределенными вершинами. Данную вершину  $x_i \in X$   $X1$  включают в  $G1(X1,U1)$ , если не происходит нарушения ограничения по числу внешних связей куска. Указанный процесс продолжается до тех пор, пока множество  $X1$  не будет содержать  $n$  элементов либо присоединение очередной нераспределенной вершины  $x_j$  к куску  $G1(X1,U1)$  не приведет к нарушению ограничения по числу внешних соединений куска, равному

$$\sum_{k \in R} \delta(x_j).$$

Следует отметить, что величина  $\sum_{k \in R, k \leq X_I} \delta(x_g)$  не

является монотонной функцией, поэтому, для того чтобы убедиться в невозможности дальнейшего формирования куска вследствие нарушения последнего ограничения, необходимо проверить его невыполнимость на последующих шагах увеличения множества  $X_I$  вплоть до  $n$ .

В качестве окончательного варианта выбирают кусок  $G_{IO}(X_{IO}, U_{IO})$ , содержащий максимально возможное число вершин графа  $G(X, U)$ , для которого выполняются ограничения на число внешних связей и входящих в него вершин ( $n_{min} - n_{max}$ ).

После преобразования куска  $G_{IO}(X_{IO}, U_{IO})$  процесс повторяют для формирования второго, третьего и т.д. кусков исходного графа с той лишь разницей, что рассмотрению подлежат вершины, не вошедшие в предыдущие куски.

Также среди достоинств данной группы алгоритмов выступает высокое быстродействие их при решении задач компоновки.

Основным недостатком последовательного алгоритма является неспособность находить глобальный минимум количества внешних связей (не анализируются возможные ситуации). Наибольшая эффективность метода последовательного разбиения графа имеет место, когда число вершин графа  $G$  значительно больше вершин в любой части разбиения.

Сущность данной группы алгоритмов заключается в выборе некоторого начального «разрезания» исходного графа на куски (вручную или с помощью последовательного метода компоновки) и последующего его улучшения с помощью итерационного парного или группового обмена вершин из различных кусков.

При этом для каждой итерации осуществляется перестановка тех вершин, которая обеспечивает максимальное

уменьшение числа связей между кусками графа или максимальное улучшение другого выбранного показателя качества с учетом используемых ограничений (например, на максимальное число внешних ребер любого отдельно взятого куска).

В случае минимизации суммарной взвешенной длины соединений формула для расчета изменения значения целевой функции при перестановке местами элементов  $r_i$  и  $r_j$ , закрепленных в позициях  $t_j$  и  $t_g$ , имеет вид

$$\Delta F_{ij}(f, g) = \sum_{p=1}^k (c_{ip} - c_{jp})(d_{jh(p)} - d_{gh(p)}),$$

где  $p$  и  $h(p)$  — порядковый номер и позиция закрепления неподвижного элемента  $r_p$ .

Если  $\Delta F_{ij}(f, g) > 0$ , то осуществляют перестановку  $r_i$  и  $r_j$ , приводящую к уменьшению целевой функции на  $\Delta F_{ij}(f, g)$ , после чего производят поиск и перестановку следующей пары элементов и т. д.

Процесс заканчивается получением такого варианта размещения, для которого дальнейшее улучшение за счет парных перестановок элементов невозможно.

Использование описанного направленного перебора сокращает общее число анализируемых вариантов размещения (по сравнению с полным перебором), но может в ряде случаев приводить к потере гарантии нахождения глобального экстремума целевой функции.

Методы ветвей и границ относятся к группе комбинаторных методов, основную идею которых составляет замена полного перебора всех решений их частичным перебором, что осуществляется отбрасыванием некоторых подмножеств вариантов, т.е. допустимых решений, заведомо не дающих оптимума; перебор при этом ведется лишь среди остающихся вариантов, являющихся в определенном смысле

"перспективными".

Таким образом, основная идея всех методов ветвей и границ базируется на использовании конечности множества вариантов и переходе от полного перебора к сокращенному (направленному) перебору.

В основе методов ветвей и границ лежат следующие основные алгоритмы, позволяющие уменьшить объем перебора.

Вычисление нижней границы (оценки) значений целевой функции  $f(x)$  на исходном множестве  $G$  (или на некотором его подмножестве), т.е. такого  $\varphi(G)$ , что для  $X \in G$  имеет место  $f(x) \geq \varphi(G)$ .

Последовательное разбиение (или ветвление) множества решений  $G$  на постепенно уменьшающиеся подмножества, т.е. образование дерева решений.

Пересчет оценок является важным этапом метода ветвей и границ. От удачного выбора методики построения оптимистической оценки во многом зависит успех применения данного метода.

Если оценка слишком «оптимистическая», то метод может превратиться фактически в метод полного перебора (так как верификация оценки происходит только на нижнем уровне иерархического дерева решений).

Если же выбраны слишком жесткая формула оценки, то по-настоящему оптимальный вариант структуры может быть отброшен на верхних уровнях поиска.

Разбивая в процессе решения исходное множества  $G$  на подмножества  $G_1, G_2, \dots, G_s$  всегда будем считать, что оценка (граница) для любого подмножества  $G_i$  не меньше оценки для множества  $G$ .

Метод ветвей и границ в случае точного вычисления оценок относится к точным методам решения задач выбора и потому в неблагоприятных ситуациях может приводить к экспоненциальной временной сложности.

Однако метод часто используют как приближенный, поскольку можно применить приближенные алгоритмы вычисления оценок.

Перечислим основные этапы решения задачи методом ветвей и границ.

1) Трансформация задачи (ТЗ). Исходную задачу заменяют другой задачей так, что множество решений исходной задачи содержится в множестве решений трансформированной задачи. Найти оптимальное решение трансформированной задачи значительно проще, чем решение исходной задачи.

2) Построение дерева решений. Множество решений ТЗ разбивают на подзадачи. Затем каждую подзадачу в свою очередь разбивают на подзадачи. В результате получается дерево решений. Процесс разбиения прекращается, если подзадача содержит не более одного решения исходной задачи, такая задача называется конечной. Если в результате работы МВГ будет построено полное дерево решений, то МВГ будет эквивалентен полному перебору, чем лучше работает МВГ, тем он дальше от полного перебора.

3) Получение нижних оценок каждая подзадача трансформированной задачи содержит какое-то число решений исходной задачи (плата за упрощение). Отсюда оптимальное решение подзадачи меньше или равно лучшему из решений исходной задачи, содержащихся в этой подзадаче. Поэтому оптимальное решение трансформированной подзадачи называют оценкой снизу для решений исходной задачи, содержащихся в этой подзадаче.

Для каждой вновь полученной подзадачи оценка снизу будет не меньше, чем оценка родительской подзадачи, так как в нее входит только часть решений.

4) Получение верхней оценки. Любое решение исходной задачи называют верхней оценкой. Верхняя оценка больше (хуже) или равна оптимальному решению.

5) Отсечения. Если для подзадачи нижняя оценка получилась больше или равна верхней оценке, то эта подзадача

заведомо не содержит решения лучше одного из уже найденных решений. Поэтому дальнейшее ее исследование не имеет смысла. Идущий от нее фрагмент дерева отсекается. Чем больше ветвей дерева отсекается, тем быстрее работает МВГ. А отсечения зависят как от качества нижних оценок, так и от качества верхней оценки (исходного размещения).

б) Ветвление. Чаще всего используется следующий способ ветвления:

- для подзадач верхнего уровня получают оценки снизу;
- подзадача с лучшей оценкой разбивается на подзадачи следующего уровня, и для них определяются оценки снизу;
- эти подзадачи добавляются к тем подзадачам, от которых еще не производилось ветвление, из них выбирается для разбиения подзадача с лучшей нижней оценкой;
- если таких подзадач несколько, то из них выбирается самого низкого уровня, если и их несколько, то выбор производится случайно.

Сформулируем метод ветвей и границ для задачи размещения элементов.

Дерево решений будем строить, закрепляя элемент за элементом в определенных ячейках. Подзадачи первого уровня получим, закрепляя первый элемент в каждой из ячеек, 2-го уровня – второй элемент в оставшихся свободных ячейках и т.д.

Верхнюю оценку получим, используя начальное размещение.

Трансформация задачи будет заключаться в том, что разрешается перераспределять часть связей между элементами, но так, чтобы суммарная длина связей не увеличивалась (тогда решения исходной задачи входят в решения трансформированной задачи, а оптимальное решение подзадач является их нижней оценкой).

Рассмотрим один из способов получения нижней оценки.  
Суммарная длина связей:

$$DS = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n r_{ij} d(s_i, s_j).$$

Если наименьший элемент матрицы R умножить на наибольший элемент матрицы D, наименьший из оставшихся элементов матрицы R на наибольший из оставшихся элементов матрицы D, и т.д., а затем сложить полученные  $N^2$  произведений, то полученный результат будет меньше или равен суммарной длине связей любой допустимой расстановки. Таким образом, это может служить нижней оценкой.

Когда часть элементов уже размещена, то суммарную длину связей можно разбить на три части:

$$DS = DS' + DS'' + DS''' , \text{ где}$$

$DS'$  - длина связей уже размещенных элементов, это точное значение;

$DS''$  - длина связей между размещенными и не размещенными элементами, точное значение неизвестно, но можно найти оценку снизу;

$DS'''$  - длина связей между не размещенными элементами, точное значение неизвестно, но можно найти оценку снизу.

Тогда нижняя оценка для подзадачи:

$$\underline{DS} = \underline{DS'} + \underline{DS''} + \underline{DS'''} .$$

Рассмотрим пример работы метода ветвей и границ. В целях упрощения расчетов примем, что четыре элемента расположены в линейке ячеек:

Расстояние между соседними ячейками равно 1. Начальная расстановка указана на рисунке.

Матрица смежности:

$$R = \begin{vmatrix} 0 & 7 & 3 & 0 \\ 7 & 0 & 3 & 8 \\ 3 & 3 & 0 & 7 \\ 0 & 8 & 7 & 0 \end{vmatrix},$$

матрица длин:  $D = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 2 & 3 \\ 1 & 0 & 1 & 2 \\ 2 & 1 & 0 & 1 \\ 3 & 2 & 1 & 0 \end{vmatrix}$

Начальная расстановка  $T = (1,2,3,4)$  дает оценку сверху  $\overline{DS} = 39$ .

Первый этап – закрепление первого элемента последовательно по всем ячейкам.

Задача 1.  $DS' = 0$ , т.к. размещен только один элемент.

Считаем  $DS''$ : из первой строки матрицы  $R$  вычеркиваем первый член (0) и упорядочиваем оставшиеся по возрастанию (0,3,7). То же самое делаем для матрицы  $D$ , но упорядочиваем по убыванию. (3,2,1)

$$\underline{DS''} = (0,3,7) \times (3,2,1) = 0 \times 3 + 3 \times 2 + 7 \times 1 = 13$$

Замечание: чтобы найти  $DS''$  необходимо для каждого размещенного элемента найти оценку снизу длины его связей с не размещенными элементами.  $i$  - номер элемента,  $t_i$  - номер ячейки, в которой он размещен. Из строки  $i$  матрицы  $R$  вычеркиваем все размещенные элементы (вектор упорядочиваем

по возрастанию). Из строки  $t_1$  матрицы  $D$  вычеркиваем все занятые ячейки (вектор упорядочиваем по убыванию). Выполняем скалярное произведение векторов.

Считаем  $DS''$ . Из матриц  $R$  и  $D$  вычеркиваем первую строку и первый столбец. Из над диагональных членов формируем два вектора  $(3,7,8)$  и  $(2,1,1)$ :

$$\underline{DS''} = (3,7,8) \times (2,1,1) = 21, \text{ тогда } \underline{DS} = 0 + 13 + 21 = 34.$$

Задача 2.  $t_1 = 2$ , то есть первый элемент закрепляем за второй ячейкой.  $DS' = 0$ .

$\underline{DS'}$  =  $(0,3,7) \times (2,1,1) = 10$ . Для подсчета  $DS''$  из матрицы  $R$  вычеркиваем первый столбец и первую строку, из матрицы  $D$  вычеркиваем второй столбец и вторую строку:

$$\underline{DS''} = (3,7,8) \times (3,2,1) = 31. \text{ Тогда } \underline{DS} = 0 + 10 + 31 = 41.$$

Задача 3.  $t_1 = 3$ , то есть первый элемент закрепляем за третьей ячейкой.

$$\underline{DS'} = 0. \quad \underline{DS''} = (0,3,7) \times (2,1,1) = 10.$$

$$\underline{DS''} = (3,7,8) \times (3,2,1) = 31.$$

$$\underline{DS} = 0 + 10 + 31 = 41.$$

Задача 4.  $t_1 = 4$ .  $DS' = 0$ .  $\underline{DS''} = (0,3,7) \times (3,2,1) = 13$ .

$$\underline{DS''} = (3,7,8) \times (2,1,1) = 21.$$

$$\underline{DS} = 0 + 13 + 21 = 34.$$

Второй этап.

Будем закреплять второй элемент в каждой из свободных ячеек. Первый элемент закрепим за ячейкой 1 (оценки снизу для задач N1 и N2). Ветви от задач N2 и N3 отсекаются, так как для них оценки снизу хуже оценки сверху.

Задача 5.  $t_1 = 1$ ,  $t_2 = 2$  (помещаем второй элемент во вторую ячейку).

$$DS' = r_{12} \times d_{12} = 7 \times 1 = 7.$$

Считаем  $DS''$ . Теперь для каждого размещенного элемента надо подсчитать связи с не размещенными элементами.

Из первой строки матрицы  $R$  вычеркиваем два первых члена, получим вектор  $(0,3)$ . Из первой строки матрицы  $D$  вычеркиваем два первых члена, получим вектор  $(3,2)$ :

$$L_1 = (0,3) \times (3,2) = 6.$$

Из второй строки  $R$  вычеркиваем два первых члена:  $(3,8)$ . Из второй строки  $D$  вычеркиваем два первых члена:  $(2,1)$ .

$$L_2 = (3,8) \times (2,1) = 14.$$

$$\underline{DS'} = 6 + 14 = 20.$$

Считаем  $DS''$ . Из  $R$  и  $D$  вычеркиваем два первых столбца и две первых строки, получим вектора:  $(7)$  и  $(1)$ :  $\underline{DS''} = 7 \times 1 = 7$ .

$$\text{Тогда: } \underline{DS} = 7 + 20 + 7 = 34.$$

Задача 6.  $t_1 = 1$ ,  $t_2 = 3$ .

$$DS' = r_{12} \times d_{13} = 7 \times 2 = 14.$$

$$L_1 = (0,3) \times (3,1) = 3, \quad L_2 = (3,8) \times (1,1) = 11, \quad \underline{DS'} = 3 + 11 = 14.$$

$$\underline{DS''} = 7 \times 2 = 14.$$

$$\underline{DS} = 14 + 14 + 14 = 42 \text{ (отсекаем эту ветвь).}$$

Задача 7.  $t_1 = 1$ ,  $t_2 = 4$ .

$$DS' = r_{12} \times d_{14} = 7 \times 3 = 21.$$

$$L_1 = (0,3) \times (2,1) = 3,$$

$$L_2 = (3,8) \times (2,1) = 14,$$

$$\underline{DS''} = 3 + 14 = 17. \quad \underline{DS''} = 7 \times 1 = 7.$$

$$\underline{DS} = 21 + 17 + 7 = 45 \text{ (отсекаем).}$$

Третий этап. Закрепление третьего элемента. Так как элементов – 4 и ячеек 4, то закрепление третьего элемента автоматически приводит к закреплению четвертого элемента, то есть на третьем этапе мы попадаем на концевые вершины. Решение трансформированной задачи на концевых вершинах совпадает с решением исходной задачи. У нас остались две необрезанные ветви от задач N4 и N5. Выбираем N5, так как она более низкого уровня.

Задача 8.  $t_1 = 1, t_2 = 2, t_3 = 3, (t_4 = 4)$ .

$\underline{DS} = DS = 39$  (уже считали).

Задача 9.  $t_1 = 1, t_2 = 2, t_3 = 4, (t_4 = 3)$ .

$DS = r_{12}d_{12} + r_{13}d_{14} + r_{14}d_{13} + r_{23}d_{24} + r_{34}d_{34} + r_{24}d_{23} = 7 \times 1 + 3 \times 3 + 0 \times 2 + 3 \times 2 + 7 \times 1 + 8 \times 1 = 37$ .

$T = (1, 2, 4, 3)$ .

Таким образом, осталась еще одна необрезанная ветвь от задачи 4, легко убедиться, что решив ее, получим симметричное решение:  $T = (3, 4, 2, 1)$ .

### Вопросы и задания к разделу

1. Дайте общую характеристику метода ветвей и границ, сформулируйте его преимущества и недостатки
2. Приведите пример структуры технического устройства по теме магистерской диссертации
3. Постройте иерархическое дерево решений по теме магистерской диссертации. Единственным ли образом можно построить такое дерево? Обоснуйте Ваш выбор.

3. Чем вызвана необходимость методов сокращенного перебора?
4. Обоснуйте выбор метода сокращенного перебора.
5. Постройте иерархическое дерево решений для размещения заданного количества элементов схемы в заданное число позиций коммутационного поля (вариант получить у преподавателя)
6. Найдите оптимистическую оценку для одной из вершин первого уровня (вариант получить у преподавателя)
7. Найдите оптимистическую оценку для одной из вершин Второго уровня (вариант получить у преподавателя)
8. Найдите оптимистическую оценку для одной из вершин третьего уровня (вариант получить у преподавателя)
9. Обоснуйте выбор метода поиска структурного оптимума по теме магистерской диссертации

## **5. ИНТЕРАКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ОРГАНИЗАЦИИ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ**

В настоящий момент в современной педагогической науке формируется и уточняется понятие «интерактивное обучение» как

- обучение, построенное на взаимодействии учащегося с учебным окружением, учебной средой, которая служит областью осваиваемого опыта;

- обучение, которое основано на психологии человеческих

взаимоотношений и взаимодействий;

- обучение, понимаемое как совместный процесс познания, где знание добывается в совместной деятельности через диалог, полилог.

Интерактивное обучение предполагает отличную от привычной логику образовательного процесса: не от теории к практике, а от формирования нового опыта к его теоретическому осмыслению через применение.

Опыт и знания участников образовательного процесса служат источником их взаимообучения и взаимообогащения. Делясь своими знаниями и опытом деятельности, участники берут на себя часть обучающих функций преподавателя, что повышает их мотивацию и способствует большей продуктивности обучения. Интерактивная модель обучения наиболее эффективна на магистерской ступени подготовки, поскольку обучаемые уже накопили жизненный и профессиональный опыт, который целесообразно применить в рамках тематики магистерской диссертации.

В качестве базовых технологий интерактивного обучения выбраны технология дискуссионного общения и кейс-технология, базирующаяся на объединении обучаемых в малые группы с учетом общности тематики научных исследований по магистерской диссертации. Предварительное обсуждение содержания и этапов исследования проводится с привлечением

преподавателей, являющихся научными руководителями магистрантов.

Дискуссия - это публичное обсуждение или свободный вербальный обмен знаниями, суждениями, идеями или мнениями по поводу какого-либо спорного вопроса, проблемы.

Ее существенными чертами являются сочетание взаимодополняющего диалога и обсуждения-спора, столкновение различных точек зрения, позиций.

Дискуссию рассматривают как метод интерактивного обучения и как особую технологию. В качестве метода дискуссия используется в семинарских (практических) занятиях. Дискуссия сама включает в себя другие методы и приемы: «мозговой штурм», анализ ситуаций и т.д.

Темой дискуссии может быть не любой вопрос, а лишь такой, который допускает различные толкования и оценки, тесно связан с современной жизнью, лично значим для обучаемого. Поэтому в ходе практических занятий применяются дискуссии, рассматривающие многоаспектные проблемы обоснования выбора базовой программной среды САПР для реализации проекта, обоснование математической постановки основных задач анализа и синтеза по тематике проектирования, выбор рациональных методов исследования, оценка результатов их применения, вопросы необходимости многовариантного анализа и поиска глобально-экстремальных решений и т.д.

Проведение дискуссий способствует формированию умений у слушателей рассматривать вопросы неоднозначно, многосторонне, поэтому её применение особенно целесообразно в тех ситуациях, когда обмен знаниями, мнениями и убеждениями может привести к новому взгляду на профессиональную деятельность.

Дискуссия – от латинского «discussion» рассмотрение, исследование. Способ организации совместной деятельности с целью интенсификации процесса принятия решения в группе, метод обучения, повышающий интенсивность и эффективность учебного процесса за счет активного включения обучаемых в

коллективный поиск истины .

Целью проведения дискуссии являются обучение, тренинг, диагностика, стимулирование творчества.

Чтобы дискуссия была эффективной, участникам необходимо обладать определенными базовыми знаниями по дисциплине в объеме, предусмотренном учебными планами подготовки бакалавров направлений 211000.62, 200100.62.

Принципами организации дискуссии являются содействие возникновению альтернативных мнений, путей решения проблемы, конструктивность критики, обеспечение психологической защищенности участников.

Технология дискуссионного общения включает в себя четыре существенных взаимосвязанных компонента:

- мотивационный (готовность, желание принять участие в дискуссии);
- познавательный (знание о предмете спора, проблемная ситуация);
- операционно-коммуникативный (умение вести спор, отстаивать свою точку зрения, владеть способами осуществления логических операций);
- эмоционально-оценочный (эмоциональные переживания,
- потребности, отношения, мотивы, оценки, личностный смысл).

Дискуссионный метод помогает решать следующие задачи:

обучение участников анализу реальных ситуаций, а также формирование навыков отделения важного от второстепенного и формулирования проблемы;

моделирование особо сложных ситуаций, когда даже самый способный специалист не в состоянии единолично охватить все аспекты проблемы;

демонстрация, характерная для большинства проблем многозначности возможных решений.

Приемы введения в дискуссию:

предъявление проблемной производственной ситуации;  
постановка проблемных вопросов;  
демонстрация видеосюжета или презентации;  
ролевое проигрывание проблемной ситуации;  
анализ противоречивых высказываний по обсуждаемой теме;

альтернативный выбор (участникам предлагается выбрать одну из нескольких точек зрения или способов решения проблемы).

Требования к выбору проблемы дискуссии:

проблема обсуждения в ходе дискуссии должна соответствовать тематике научно-исследовательской работе магистранта и содержанию учебной дисциплины;

проблема дискуссии должна опираться на имеющиеся у участников дискуссии знания, умения, опыт творческой и эмоциональной ценностной деятельности;

спор должен быть основан на главных вопросах, нести в себе существенные противоречия (дискуссия — спор по существу).

Мотивационный (подготовительный) этап связан с подготовкой дискуссии и проводится коллективно (студенты объединяются в группы по 2-3 человека, проводят подготовительный поиск информации с использованием информационных ресурсов сети Интернет, обмениваются информацией по электронной почте, готовят презентационные материалы).

Содержательно-операционный этап включает проведение дискуссии. Дискуссия состоит из вступления, в котором обосновываются выбор темы, вопросы, уточняются условия дискуссии, указываются узловые моменты обсуждаемой проблемы, создается необходимый эмоциональный настрой.

Следующим элементом дискуссии является непосредственно спор. Во время обсуждения проблемы должна быть обстановка соучастия, в которой можно допускать ошибки, говорить неточности, ориентироваться на собственный опыт.

Ведущий дискуссии — преподаватель — может использовать следующие примеры активизации ее участников: заострение противоположных точек зрения, подбадривание и поощрение участников спора.

Функции преподавателя во время дискуссии:

сформировать проблему и тему дискуссии, создать необходимую мотивацию, т.е. показать значимость проблемы для участников;

сформировать вместе с участниками правила ведения дискуссии;

руководить дискуссией: поддерживать высокий уровень активности участников, соблюдать регламент, подключать пассивных участников;

фиксировать предложенные идеи на плакате или доске, чтобы исключить дублирование;

оперативно проводить анализ высказанных идей, мнений.

Любая дискуссия предполагает умение пользоваться гипотезой, доказательством и опровержением как приемами познавательной деятельности.

Гипотеза должна отличаться простотой, обладать доказательной силой, опираться на ранее полученные знания, содержать предположения, которые можно проверить. Для овладения умениями доказательства и опровержения следует использовать памятку о порядке мыслительных действий:

выслушав формулировку вопроса, определите, в чем состоит проблема;

сформулируйте гипотезу (предположение);

выскажите предположение, аргументируя его четко, ясно, не повторяя того, что уже сказано;

внимательно слушайте доводы товарищей, имеющих противоположную точку зрения, найдите в них сильные и слабые стороны;

опровергните доводы.

Дискуссия — способ отыскания решения спорной проблемы, а не только способ доказательства и опровержения, поэтому сделайте вывод, к которому привела вас дискуссия.

Оценочно-рефлексивный этап состоит в подведении итогов дискуссии. Он включает анализ выводов дискуссии, оценку правильности употребления присутствовавших в дискуссии понятий, глубины аргументов, умения использовать доказательства, опровержения, выдвигать гипотезы, учитывается культурный уровень дискуссии, умение делать выбор.

На заключительном этапе можно не только указать путь решения обсуждаемой проблемы, но и поставить новые вопросы, требующие решения.

Дать пищу для раздумий — это значит увидеть перспективу развития участников дискуссионного общения.

Одно из главных значений дискуссии — не столько всестороннее и глубокое решение проблемы, сколько побуждение участников задуматься над ней, а также осуществить пересмотр своих убеждений и представлений, уточнить и определить свою позицию, научиться аргументированно отстаивать собственную точку зрения и в то же время осознавать право других иметь свой взгляд на обсуждаемую проблему, быть индивидуальностью.

Технология дискуссионного общения — основа личностно-ориентированного образования.

Одной из форм интерактивного обучения является метод коллективного анализа ситуаций (кейс-метод). Он завоевывает позитивное отношение со стороны обучающихся, которые видят в нем игру, где они имеют возможность проявить и усовершенствовать аналитические и оценочные навыки, научиться работать в команде, применить на практике теоретический материал, увидеть неоднозначность решения проблем в реальной жизни, найти наиболее рациональное решение.

Кейс-метод (Case study) — это техника обучения, использующая описание реальных ситуаций (от англ. case— «случай»). Под ситуацией(кейсом) понимается письменное описание какой-либо конкретной реальной ситуации. Обучающихся просят проанализировать эту ситуацию, разобраться в сути проблем, предложить возможные варианты решения и выбрать лучший из них.

Кейс-метод это сложная многоаспектная технология обучения, которая представляет собой специфическую разновидность исследовательской аналитической технологии, т. е. включает в себя операции исследовательского процесса, аналитические процедуры, выступает как способ коллективного обучения, важнейшими составляющими которого являются работа в группе и подгруппах, взаимный обмен информацией.

Кейс-метод можно рассматривать как синергетическую технологию, суть которой заключается в подготовке процедур погружения группы в ситуацию, формировании эффектов умножения знания, инсайтного озарения, обмена открытиями и т. п. Кейс-метод интегрирует в себя формы развивающего обучения, включая процедуры индивидуального, группового и коллективного развития, формирования многообразных личностных качеств обучаемых.

Данный метод представляет специфическую разновидность проектной технологии.

В проектной технологии процесс разрешения имеющейся проблемы осуществляется посредством совместной деятельности учащихся, тогда как в кейс-методе формирование проблемы и путей ее решения происходит на основании кейса, который является одновременно и техническим заданием, и источником информации для осознания вариантов эффективных действий.

По отношению к другим технологиям обучения кейс-метод можно представить как сложную систему, в которую интегрированы другие, более простые методы познания. В него входят моделирование, системный анализ, проблемный метод,

мысленный эксперимент, методы описания, классификации, дискуссии, игровые методы и др.

К кейс-технологиям относятся:

- метод ситуационного анализа;
- ситуационные задачи и упражнения;
- анализ конкретных ситуаций (кейс-стади);
- метод кейсов;
- метод инцидента;
- метод разбора деловой корреспонденции;
- игровое проектирование;
- метод ситуационно-ролевых игр.

Кейс-технология позволяет более успешно по сравнению с традиционной методикой обучения развивать творческие способности обучающихся, формирует навыки выполнения сложных заданий в составе небольших групп, помогает специалистам успешно овладеть способностями анализа непредвиденной ситуации, самостоятельно разрабатывать алгоритмы принятия решения.

Этот метод также способствует развитию технического мышления, формированию таких качеств, как инициативность и самостоятельность.

Можно выделить различные виды кейсов:

- практические (отражают реальные жизненные ситуации);
- обучающие (направлены на развитие образовательных курсов);
- научно-исследовательские.

Различают несколько видов ситуаций для формирования кейса.

Ситуация-иллюстрация представляет ситуацию и поясняет причины ее возникновения, описывает процедуру ее решения. Цель обучаемых: оценить ситуацию в целом, провести анализ ее решения, сформулировать вопросы, выразить согласие-несогласие.

Ситуация-проблема представляет собой описание реальной проблемной ситуации. Цель обучаемых: найти решение ситуации или прийти к выводу о его невозможности.

Ситуация-оценка описывает положение, выход из которого уже найден. Цель обучаемых: провести критический анализ принятых решений, дать мотивированное заключение по поводу представленной ситуации и ее решения.

Ситуация-упражнение описывает применение уже принятых ранее решений, в связи с чем ситуация носит тренировочный характер, служит иллюстрацией к той или иной теме. Цель обучаемых: проанализировать данные ситуации и найденные решения, используя при этом приобретенные теоретические знания.

Кейсы могут быть розданы каждому обучающемуся за день до занятий или на самом занятии. На ознакомление выделяется 5—7 мин в зависимости от его сложности. Преподаватель начинает занятие с контроля знания обучающимися (слушателями) содержания кейса.

Далее участники задают руководителю вопросы с целью уточнения ситуации и получения дополнительной информации, которая фиксируется на доске для последующего обсуждения.

Анализ ситуации выполняется индивидуально или в малых группах.

Каждый из участников представляет свой вариант решения в виде устного доклада (регламент устанавливается). Если участников много, то группа разбивается на подгруппы, от каждой из которых выступает представитель.

После деления на микрогруппы дается определенное время для решения проблемы, подготовки и выступления (30—40 мин). Жесткое требование — укладываться в установленные сроки. Участники выявляют проблему, вырабатывают, оценивают и выбирают оптимальное решение, готовятся к презентации. Преподаватель, обходя группы и давая некоторые пояснения, должен избегать прямых консультаций. Необходимо

предоставить обучающимся возможность использовать учебную, методическую и справочную литературу.

При относительно однородном составе групп слушатели выбирают спикера самостоятельно, однако иногда полезно назначить спикера в самый последний момент «волевым решением» преподавателя.

Этап презентации решений по кейсам. Презентация, или представление результатов анализа кейса и его составляющих, выступает очень важным аспектом кейс-метода. Умение публично представить интеллектуальный продукт, хорошо его прорекламирровать, показать его достоинства и возможные направления эффективного использования, а также выстоять под шквалом критики представляется очень ценным интегральным качеством современного специалиста. Представляют решение кейса от каждой малой группы 1 — 2 участника (спикера). Время — до 10—15 мин, при этом максимально поощряется использование плакатов, схем, графиков (которые малые группы должны подготовить на предыдущем этапе); если правильным признается решение, противоположное выступлению спикера, то это означает, что малая группа не справилась с кейсом.

Участники задают выступающему вопросы, на которые он должен либо ответить, либо внести обоснованное возражение. Преподаватель лишь направляет дискуссию. Каждый вариант решения фиксируется на отдельном листе бумаги (для удобства работы и дальнейшего подведения итогов).

Этап общей дискуссии состоит в следующем.

Как правило, во всех дискуссиях при обсуждении ситуационных упражнений формулируются четыре основных вопроса:

- почему ситуация выглядит как дилемма;
- кто принимал решения;
- какие варианты решения были предложены;
- что ему надо было сделать.

Учитывая ответы на эти вопросы, преподаватель должен прогнозировать развитие дискуссии и корректировать ее ход, ставя те вопросы и освещая те моменты, на рассмотрение которых целесообразно направить обсуждение. На этом этапе важно:

не ограничивать время;

дать возможность выступить каждому;

заострить внимание выступающих на конкретных проблемах данного кейса;

провести голосование «Чье решение было самым удачным?»).

Этап подведения итогов - завершающее выступление преподавателя. Продолжительность — 10—15 мин.

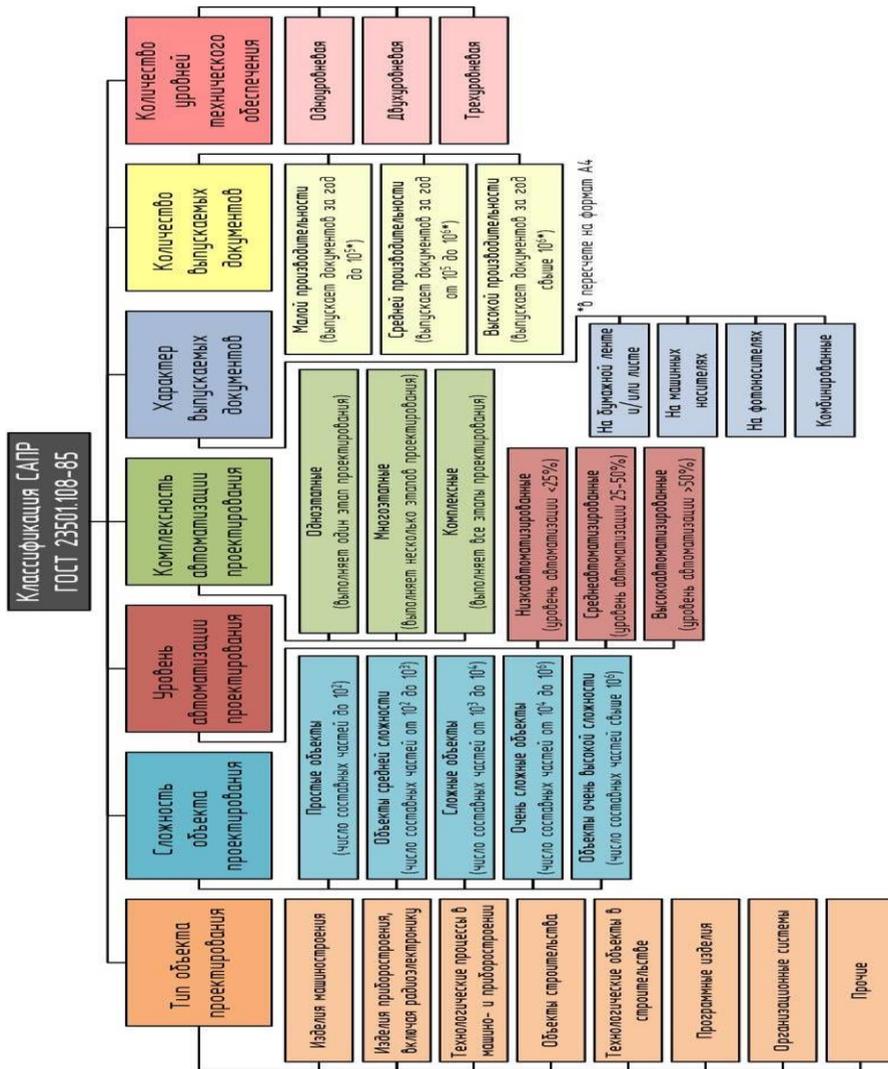
Преподаватель должен «раскрыть карты». Для кейсов, написанных на примере реальных конкретных ситуаций, это информация о том, как были решены проблемы, которые обсуждались слушателями, в реальной жизни.

Для «кабинетных» кейсов важно обосновать версию преподавателя. Следует акцентировать внимание на том, что кейс может иметь и другие решения: «Жизнь богаче любой теории», а затем выделить лучшие решения и расставить акценты поощрительного характера.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Задачи структурного синтеза являются одними из наиболее сложно формализуемых задач автоматизации проектирования, поэтому далеко не все задачи синтеза структуры технических объектов алгоритмизированы и доведены до решения в автоматическом режиме. В большинстве случаев в процессе синтеза центральную роль по-прежнему играет человек в режиме интерактивного взаимодействия со средой автоматизированного проектирования.

КЛАССИФИКАЦИЯ САПР ПО ГОСТ 23501.108-85



## ПРИЛОЖЕНИЕ 2

### МАТРИЧНЫЕ И ГРАФОВЫЕ МОДЕЛИ

#### КОНСТРУКЦИЙ РЭС

Исходные данные вариантов для выполнения практического занятия приведены в приложении 3. Номер варианта задания определяется по последней цифре шифра зачетной книжки (если последняя цифра 0, то берется 10 вариант).

Задание на контрольную работу заключается в следующем. По заданной матрице цепей  $T$  восстановить коммутационную схему (КС) РЭС. Для полученной схемы РЭС получить следующие структурные модели:

- граф коммутационной схемы РЭС (ГКС);
- мультиграф схемы и его матрицу смежности  $R_m$ ;
- граф элементарных комплексов (ГЭК) и его матрицу (Q);
- взвешенный граф КС РЭС и его матрицу смежности  $R_v$ .

При изображении КС РЭС и ее графа элементы схемы следует располагать таким образом, чтобы число пересечений проводников было минимальным.

#### МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Модели схем РЭС в виде графов и матриц относятся к разряду структурных моделей, описывающим состав изделия и взаимосвязь его элементов.

Данные модели используются при решении базовых задач структурного синтеза в конструкторском проектировании РЭС

- компоновки модулей,
- размещения элементов,
- трассировки соединений.

При этом следует иметь в виду, что если матричные модели используют для машинного представления коммутационной

схемы, то применение графов обеспечивает представление схемы РЭС для проектировщика в удобной для анализа форме.

Рассматривая структуру коммутационной схемы РЭС, принято выделять элементы трех множеств: множества цепей (E), множества контактов (C), множества элементов схемы (X).

Например, для коммутационной схемы, изображенной на рис. П 1, в структурной модели используются следующие множества:

$$E = \{l_1, l_2, l_3, l_4, l_5, l_6, l_7\}; \quad X = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_0\};$$

$$C = \{c_{11}, c_{12}, c_{21}, c_{22}, c_{23}, c_{24}, c_{25}, c_{31}, c_{32}, c_{33}, c_{34}, c_{41}, c_{42}, c_{51}, c_{01}, c_{02}\}.$$

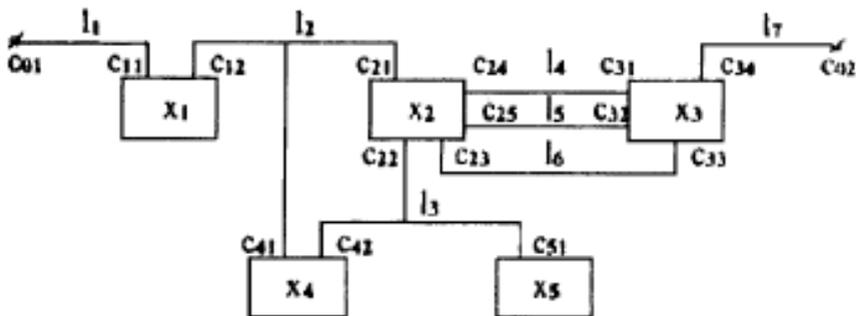


Рис. П1. Коммутационная схема

Примечание:  $x_0$  - фиктивный нулевой элемент, которому приписывают внешние выходы коммутационной схемы.

При описании контактов (выводов) элементов схемы принята следующая система обозначений:  $C_{ij}$ , где  $i$  - порядковый номер элемента схемы,  $j$  - порядковый номер контакта данного элемента.

Например,  $C_{31}$  - первый контакт элемента  $X_3$ .

Наиболее полное описание коммутационной схемы РЭС обеспечивает граф коммутационной схемы (ГКС) и его матричный аналог - матрица цепей (Т).

Всякий граф, по определению, задает отношение между

множеством его вершин (элементов структуры) и множеством ребер графа (связи между элементами и).

Для ГКС элементы структуры - это элементы трех типов: цепи, контакты, элементы схемы. Например, для коммутационной схемы, изображенной на рис. П1 граф коммутационной схемы приведен на рис. П2 .

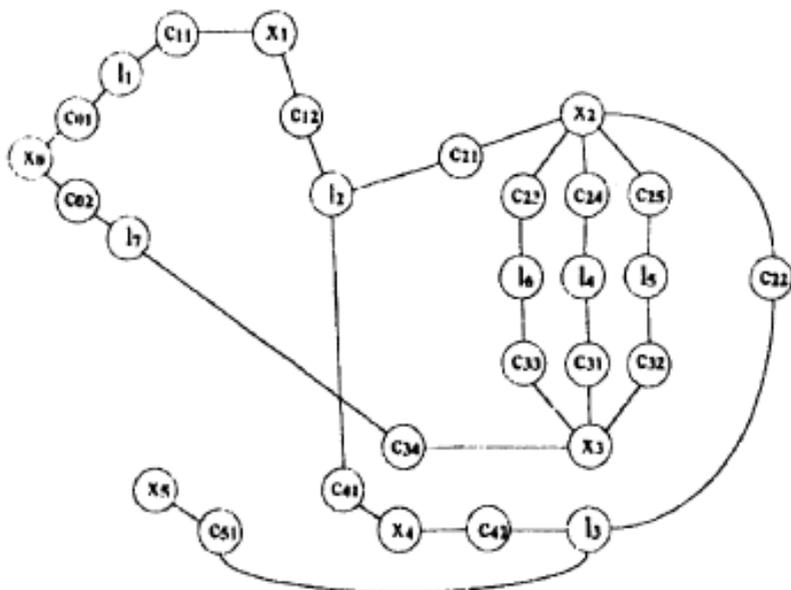


Рис. П2. Граф коммутационной схемы

Единственная матрица, которая полностью описывает схему РЭС, это матрица цепей  $T = \{t_{ij}\}$ ,  $i = 1, \dots, n$ ,  $j = 1, \dots, k$ , где  $n$  - число элементов схемы,  $k$  - максимальное число контактов у одного элемента, а  $t_{ij}$  - номер цепи, которой принадлежит  $j$ -ый контакт  $i$ -го элемента схемы, (для схемы, приведенной на рис. 2  $k=5$ ).

Матрица  $T$  для коммутационной схемы (рис. П 1) имеет размерность  $6 \times 5$ ,  $t_{ij} = 0$ , если у элемента  $X_i$  нет  $j$ -го контакта.

$$\hat{T} = \begin{array}{rcccccc} & & C_{i1} & C_{i2} & C_{i3} & C_{i4} & C_{i5} \\ x_1 & & 1 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ x_2 & & 2 & 3 & 6 & 4 & 5 \\ x_3 & & 4 & 5 & 6 & 7 & 0 \\ x_4 & & 2 & 3 & 0 & 0 & 0 \\ x_5 & & 3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ x_0 & & 1 & 7 & 0 & 0 & 0 \end{array}$$

Граф элементарных комплексов (ГЭК) задает связь между элементами КС РЭС и цепями, в нем используются вершины двух типов: элементы  $X_i$ ,  $i = 1, \dots, n$  и цепи  $l_j$ ,  $j = 1, \dots, m$ .

ГЭК для КС (рис. П1) приведен на рис. П3.

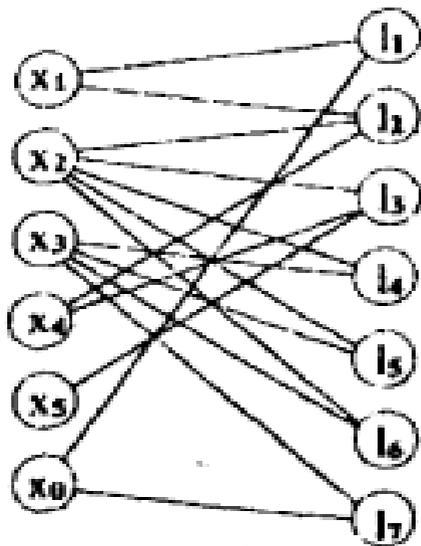


Рис. П3. Граф элементарных комплексов

Матрица элементарных комплексов  $Q$  строится по правилу:  $q_{ij}=1$ , если элемент  $x_i$  принадлежит цепи  $l_j$  и  $q_{ij}=0$  в противном случае. Матрица  $Q$  имеет размерность  $n \times m$ .

Матрица  $Q$  для КС (рис. П1) приведена ниже.

Элементарный комплекс - это множество элементов схемы, принадлежащих одной цепи.

$$\hat{Q} = \begin{array}{c|ccccccc} & l_1 & l_2 & l_3 & l_4 & l_5 & l_6 & l_7 \\ \hline x_1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ x_2 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ x_3 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ x_4 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ x_5 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ x_0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{array}$$

Мультиграф КС РЭС описывает связи между элементами схемы. При этом два элемента могут быть связаны более чем одним ребром (в зависимости от того, по фрагментам скольких цепей элемент  $X_i$  связан с элементом  $X_j$ ).

Мультиграф КС (рис. П1) приведен на рис. П4.

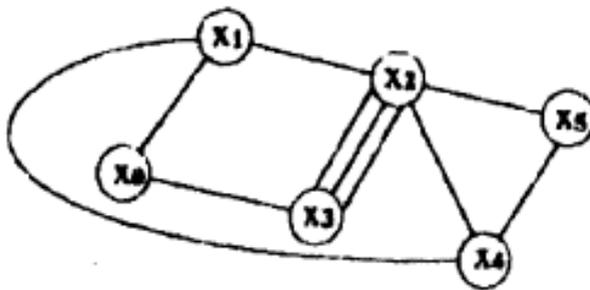


Рис. П4. Мультиграф коммутационной схемы

Матрицу смежности мультиграфа ( $R_M$ ) рассчитывают по формуле:

$$r_{ij}^M = \begin{cases} \sum_{l=1}^m q_{il} \cdot q_{jl}, i \neq j \\ 0, i = j \end{cases}$$

где  $i, j = 1, \dots, n$ ,  $n$  - число элементов схемы,  $q_{il}$ ,  $q_{jl}$  - элементы матрицы элементных комплексов  $Q$ ,  $m$  - число цепей КС РЭС.

Матрица смежности мультиграфа  $R_M$  для КС (рис. П1) приведена ниже

$$\hat{R}_M = \begin{array}{c|cccccc} & x_1 & x_2 & x_3 & x_4 & x_5 & x_0 \\ \hline x_1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ x_2 & 1 & 0 & 3 & 2 & 1 & 0 \\ x_3 & 0 & 3 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ x_4 & 1 & 2 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ x_5 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ x_0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{array}$$

Элементы матрицы смежности взвешенного графа коммутационной схемы  $R_B$  рассчитываются по формуле

$$r_{ij}^B = \begin{cases} \sum_{l=1}^m d_l \cdot q_{il} \cdot q_{jl}, i \neq j \\ 0, i = j \end{cases}$$

где  $i, j = 1, \dots, n$ ,  $n$  - число элементов схемы,  $q_{il}$ ,  $q_{jl}$  - элементы матрицы элементных комплексов  $Q$ ,  $m$  - число цепей КС РЭС,  $d_l$  - вес  $l$ -ой цепи,  $p_i$  - длина  $i$ -ой цепи (число элементов, принадлежащих данной цепи)

Матрица смежности взвешенного графа  $R_B$  для КС (рис. П1) вместе с использованной для ее расчета матрицей элементарных ком плексов  $Q$  приведены ниже.

$$\hat{R}_B =$$

	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_0$
$x_1$	0	2/3	0	2/3	0	1
$x_2$	2/3	0	3	4/3	2/3	0
$x_3$	0	3	0	0	0	1
$x_4$	2/3	4/3	0	0	2/3	0
$x_5$	0	2/3	0	2/3	0	0
$x_0$	1	0	1	0	0	0

$$\hat{Q} =$$

	$l_1$	$l_2$	$l_3$	$l_4$	$l_5$	$l_6$	$l_7$
$x_1$	1	1	0	0	0	0	0
$x_2$	0	1	1	1	1	1	0
$x_3$	0	0	0	1	1	1	1
$x_4$	0	1	1	0	0	0	0
$x_5$	0	0	1	0	0	0	0
$x_0$	1	0	0	0	0	0	1
$\rho_l$	2	3	3	2	2	2	2
$d_l$	1	2/3	2/3	1	1	1	1

$$r_{24}^B = \sum_{l=1}^7 d_l \cdot d_{2l} \cdot d_{4l} = d_1 \cdot q_{21} \cdot q_{41} + d_2 \cdot q_{22} \cdot q_{42} +$$

$$+ d_3 \cdot q_{23} \cdot q_{43} + d_4 \cdot q_{24} \cdot q_{44} + d_5 \cdot q_{25} \cdot q_{45} + d_6 \cdot q_{26} \cdot q_{46} + d_7 \cdot q_{27} \cdot q_{47} =$$

$$= 1 \cdot 0 \cdot 0 + \frac{2}{3} \cdot 1 \cdot 1 + \frac{2}{3} \cdot 1 \cdot 1 + 1 \cdot 1 \cdot 0 + 1 \cdot 1 \cdot 0 + 1 \cdot 1 \cdot 0 + 1 \cdot 0 \cdot 0 = \frac{2}{3} + \frac{2}{3} = \frac{4}{3}$$

Взвешенный граф КС РЭС отличается от мультиграфа тем, что изображается только одно ребро графа, над которым указывает-

ся его вес. Взвешенный граф КС (рис. П1) приведен на рис. П5.

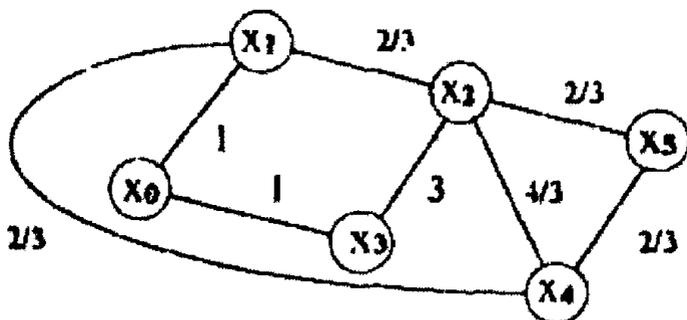


Рис. П5. Мультиграф взвешенного графа коммутационной  
схемы

### ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Таблица А1

	Вариант 1					Вариант 2					Вариант 3				
	c <sub>11</sub>	c <sub>12</sub>	c <sub>13</sub>	c <sub>14</sub>	c <sub>15</sub>	c <sub>11</sub>	c <sub>12</sub>	c <sub>13</sub>	c <sub>14</sub>	c <sub>15</sub>	c <sub>11</sub>	c <sub>12</sub>	c <sub>13</sub>	c <sub>14</sub>	c <sub>15</sub>
x <sub>1</sub>	1	2	4	0	0	2	3	7	6	0	4	5	7	0	0
x <sub>2</sub>	2	5	6	7	0	4	1	2	0	0	1	2	4	3	0
x <sub>3</sub>	1	0	0	0	0	3	5	6	2	1	2	5	1	0	0
x <sub>4</sub>	4	6	7	1	5	2	1	0	0	0	6	7	1	2	5
x <sub>5</sub>	3	2	5	0	0	4	3	7	0	0	4	3	0	0	0
x <sub>6</sub>	2	4	6	1	0	6	5	0	0	0	6	2	5	0	0
x <sub>0</sub>	5	2	3	0	0	7	4	1	0	0	7	1	0	0	0
	Вариант 4					Вариант 5					Вариант 6				
	c <sub>11</sub>	c <sub>12</sub>	c <sub>13</sub>	c <sub>14</sub>	c <sub>15</sub>	c <sub>11</sub>	c <sub>12</sub>	c <sub>13</sub>	c <sub>14</sub>	c <sub>15</sub>	c <sub>11</sub>	c <sub>12</sub>	c <sub>13</sub>	c <sub>14</sub>	c <sub>15</sub>
x <sub>1</sub>	3	5	7	1	2	2	6	7	0	0	2	5	6	7	0
x <sub>2</sub>	2	3	1	0	0	5	4	0	0	0	3	4	0	0	0
x <sub>3</sub>	4	5	2	0	0	2	7	6	4	1	1	3	5	0	0
x <sub>4</sub>	6	4	1	3	0	3	0	0	0	0	5	2	4	1	7
x <sub>5</sub>	7	5	2	0	0	4	1	2	7	0	2	5	3	0	0
x <sub>6</sub>	3	4	0	0	0	1	3	5	0	0	1	3	4	6	0
x <sub>0</sub>	5	3	4	2	0	3	2	0	0	0	7	2	0	0	0
	Вариант 7					Вариант 8					Вариант 9				
	c <sub>11</sub>	c <sub>12</sub>	c <sub>13</sub>	c <sub>14</sub>	c <sub>15</sub>	c <sub>11</sub>	c <sub>12</sub>	c <sub>13</sub>	c <sub>14</sub>	c <sub>15</sub>	c <sub>11</sub>	c <sub>12</sub>	c <sub>13</sub>	c <sub>14</sub>	c <sub>15</sub>
x <sub>1</sub>	1	3	2	4	5	4	7	6	2	1	4	2	1	5	0
x <sub>2</sub>	2	4	6	0	0	1	2	4	0	0	3	5	0	0	0
x <sub>3</sub>	3	2	5	0	0	3	2	0	0	0	4	5	1	0	0
x <sub>4</sub>	6	3	0	0	0	1	3	6	0	0	4	7	0	0	0
x <sub>5</sub>	5	4	2	0	0	2	0	0	0	0	7	6	3	0	0
x <sub>6</sub>	1	7	0	0	0	4	5	3	6	0	1	5	7	2	4
x <sub>0</sub>	6	1	2	0	0	7	2	0	0	0	6	0	0	0	0

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Советов В.Я. Информационные технологии проектирования/ В. Я. Советов.-М.: Высшая школа, 2010.- 176 с.
2. Советов В.Я. Моделирование систем/ В. Я. Советов.-М.: Высшая школа, 2010.-150с.
3. Самойленко Н.Э. Методы оптимизации в проектировании РЭС/ Н.Э. Самойленко, О.Ю. Макаров.- Воронеж: ВГТУ, 2006. 120 с. (гриф УМО)
4. Норенков И.П. Основы автоматизированного проектирования: учебник для вузов / И.П. Норенков. М.: Высш. шк., 2002. 386 с.
5. Автоматизированное проектирование радиоэлектронных средств: учеб. пособие для вузов /О.В. Алексеев, А.А. Головков, И.Ю. Пивоваров и др.; под ред. О.В. Алексеева. М.: Высш. шк., 2000. 479 с.
6. Автоматизация проектных исследований надежности радиоэлектронной аппаратуры: Научное издание. // Жаднов В.В., Кофанов Ю.Н., Малютин Н.В. и др. - М.: Изд-во "Радио и связь", 2003. - 156 с.
7. Пети Дж. Современное обучение. Практическое руководство.- М.: Ломоносовъ, 2010.-624 с.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	3
1. Современные САПР.....	6
2. Методика автоматизированного проектирования электронных средств .....	9
3. Особенности применения метода конечных элементов .....	26
4. Методы полного и сокращенного перебора на иерархическом дереве решений .....	36
5. Интерактивные технологии в организации практических занятий.....	58
Заключение.....	69
Приложение 1. Классификация САПР по ГОСТ 23501.108-85..	71
Приложение 2. Матричные и графовые модели конструкций РЭС.....	72
Приложение 3. ....	80
Библиографический список.....	81

Учебное издание

Самойленко Наталья Эдуардовна  
Ципина Наталья Викторовна

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ  
СТРУКТУРНОГО СИНТЕЗА В ЗАДАЧАХ  
ПРОЕКТИРОВАНИЯ РЭС: ПРАКТИКУМ

В авторской редакции

Компьютерный набор Н.Э. Самойленко

Подписано к изданию . .2022.

Объём данных 1 Мб.

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический  
университет»

394026 Воронеж, Московский просп., 14